

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№3–2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 3 (57) - 2019

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Smart Grid системи та технології
Енергетичні системи та комплекси
Енергетична ефективність та енергозбереження
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та
обладнанням
Екологічні проблеми в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецкі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИHЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 11 від 9 грудня 2019 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

Увага! Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 3 (57) – 2019

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Smart Grid system of ta technologies
Energy systems and complexes
Energy efficiency and energy savings
Monitoring, diagnostics and management of energy processes and
equipment
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

Deputy editors-in-chief S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

Deputy O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775ПП dated 14 June 2017

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 11 on December 9, 2019).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O. Ishchenko.
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019

ЗМІСТ

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

С.П. Денисюк, Р. Стржелецки. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами 7

І.Ю. Бойко. Актуальність застосування динамічної тарифікації для генеруючих систем MicroGrid 23

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

О.Ю. Черноусенко, В.А. Пешко, Б.О. Марисюк. Раціоналізація підходів числового моделювання геометрично-складного обертового обладнання електричних станцій..... 30

В.А. Попов, О.С. Ярмолюк, М.М. Федосенко, В.В. Ткаченко. Порівняльна оцінка альтернативних варіантів застосування розосередженої генерації за сукупністю режимних показників із урахуванням невизначеності інформації 37

Д.Г. Дерев'яноко, В.С. Панасенко, О.С. Масло, О.М. Загорський. Оцінювання надійності у локальних системах з установками відновлювальної енергетики..... 46

О.Є. Малярченко, Н.Ю. Майстренко, В.В. Станиціна, О.Ю. Богославська. Розвинутий комплексний метод прогнозування енергоспоживання при різних сценаріях розвитку економіки на довгострокову перспективу..... 53

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

М.К. Безродний, Н.О. Притула, І.Ю. Опанасюк. Комбінована теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря..... 65

С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, А. Халем. Підвищення енергоефективності автономного джерела електричної енергії шляхом регулювання газорозподілу двигунів внутрішнього згорання 74

Л.Я. Кулаковський, А.В. Босак. Формування факторної моделі процесу сушіння торфу в пневмопароводяних сушарках 82

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

М.А. Коваленко, О.О. Самойленко. Розробка експериментального стенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням. 87

Л.Н. Ширін, І.В. Інюткін, А.Л. Ширін, М.І. Сергієнко. Удосконалення методів контролю та діагностики технічного стану самохідного транспортно-технологічного обладнання гірничих підприємств 94

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ

О.А. Крюковська, Є.Є. Литвинова. Заходи безпеки у виробництві композиційних матеріалів на основі епоксидних та фенолформальдегідних смол 104

Вимоги до оформлення статей..... 110

CONTENTS

SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

- S. Denysiuk, R. Strzelecki.** Formation of components of smart platform for the management of power systems and networks..... 7
- I. Boiko.** Relevance of dynamic tariffication application for MicroGrid generation systems..... 23

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- O. Chernousenko, V. Peshko, B. Marysiuk.** Rationalization of the approaches of numerical simulation of the geometrically complex rotating equipment of electrical stations..... 30
- V. Popov, O. Yarmoliuk, M. Fedosenko, V. Tkachenko.** Comparative evaluation of alternatives of distributed generation application considering mode of operation characteristics and uncertainty of information 37
- D. Derevyanko, V. Panasenko, A. Maslo, A Zagorsky.** Assessment of reliability in local systems with renewable energy systems..... 46
- O. Malyarenko, N. Maistrenko, V. Stanytsina, O. Bogoslavska.** Improved complex method of forecasting energy consumption on a long-term perspective 53

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

- M. Bezrodny, N. Prytula, I. Opanasyuk.** Combined heat pump air heating and ventilation system with recirculation and heat recoverer 65
- S. Zaichenko, S. Shevchuk, A. Halem.** Improving the energy efficiency of an autonomous source of electric energy by regulating the gas distribution of an internal combustion engine 74
- L. Kulakovskiy, A. Bosak.** Creating factor model of the peat drying process in pneumatic steam-water dryer 82

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

- M. Kovalenko, O. Samoilenko.** Development of an device for small power direct current motors testing with electromagnetic excitation..... 87
- L. Shyrin, I. Inyutkin, A. Shyrin, M. Sergiienko.** Improving methods for monitoring and diagnosing the technical condition of self-propelled transport and technological equipment of mining enterprises 94

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- O. Krukovska, Y. Lytvynova.** Safety measures in the manufacturing of composite materials based on epoxy and phenol-formaldehyde resins..... 104
- Requirements for the articles 110

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-6299-3680

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Р. Стржеleckи, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-9437-9450

Гданський університет технологій, Польща

ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА МЕРЕЖАМИ

Розглянуто особливості реалізації концепції Smart Grid в сучасних енергетичних системах і мережах з врахуванням драйверів сучасної енергетики, зокрема, Інтернет енергії, Інтернет речей, розосередженої генерації, розвитку клієнтських сервісів та агрегаторів попиту і пропозиції на електроенергію. Оцінено базові компоненти розвитку електроенергетики з врахуванням вимог енергетичного переходу, дигіталізації економіки, зокрема, бізнес-додатків та інформаційно-комунікаційних систем. Наведено елементи сучасної технологічної платформи Smart Grid. Дана оцінка особливостей формування інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та електричними мережами для окремих енергетичних компаній.

Детально розглянуто особливості побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS). Особливості роботи DEMS проаналізовано на прикладі системи DEMS компанії Siemens. Розглянуто функції планування і функції керування DEMS. Показано, що керування DEMS забезпечують контроль і моніторинг потужності всіх генераторів електроенергії, обладнання зберігання і гнучким попитом, а також можливість керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією.

Представлено основні функції системи керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS). Як складові клієнтоорієнтованої платформи керування розподільними електричними мережами проаналізовано системи керування, що розроблені компаніями Oracle, ETAP та Schneider Electric. Наведемо характеристику окремих модулів ETAP ADMS та базових функцій SE ADMS, розроблених відповідно компаніями ETAP та Schneider Electric.

Ключові слова: Smart Grid, енергетичні системи, електричні мережі, інтелектуальне керування, децентралізовані системи керування енергією, системи керування розподілом електроенергії.

ВСТУП

Сьогодні у багатьох розвинених країнах світу реалізуються сценарії так званого енергетичного переходу, в рамках якого сучасна енергетика трансформується до клієнтоцентричних енергосистем [1–3, 6]. Здійснюється перехід від традиційних моделей до нових, що використовують значні обсяги розосередженої генерації (РГ), включаючи відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та накопичувачі. Ринки стають децентралізованими, інфраструктура – інтелектуальною, а споживачі переходять до активних, просюмерських моделей поведінки.

Складовими діючої на сьогодні домінуючої енергетичної парадигми, що склалися в кінці 20-х роках ХХІ ст., є: домінування джерел електроенергії на основі вуглеводневого палива; великі вертикально інтегровані енергетичні компанії; централізовані електричні мережі; односпрямованість потоків електроенергії – від генератора до споживача; одночасність процесів виробництва та споживання електроенергії; широке використання органічного палива в промисловості та на транспорті [1 – 3, 6, 15]. Складові майбутньої (нової) енергетики, що зараз формуються: «чиста енергія» ВДЕ; глибока децентралізація виробництва енергії; зростання ролі електроенергії в структурі споживання паливно-енергетичних ресурсів; децентралізовані ринки, приватні інвестиції; інтелектуалізація базової інфраструктури, розвиток технологій Smart Grid; перехід споживачів до активних моделей поведінки; технології накопичення енергії; зростання ефективності використання енергії; зростання рівнів електрифікації промисловості та транспорту [2, 5, 8, 9, 13, 15]. Драйверами нових змін є технологічні досягнення в інших галузях, перш за все, у сферах передачі та обробки інформації, інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), силовій електроніки та сучасних методів і моделей керування великими системами.

© С.П. Денисюк, Р. Стржеleckи, 2019

Необхідно відзначити інтенсивне просування у процесі переходу до цифрової, а фактично – до інтелектуальної електроенергетики, яке здійснюється при активній підтримці держави в Європі, США, Японії, Кореї. Зокрема, на європейських ринках електроенергії запроваджуються нові правила, які сприятимуть подальшому залученню ВДЕ, зростанню конкуренції і гнучкості енергосистем, активізації участі споживачів та збільшенню інвестицій [1, 5–8, 21, 24].

Так, регламент ЄС, що встановлює модель ринку електроенергії (Electricity Market Design, EMD), був офіційно ухвалений у травні 2019 року. Перехід до ВДЕ та підвищення рівнів електрифікації є критично важливими, щоб досягти в Європі до 2050 року рівня вуглецевої нейтральності. В умовах нестабільного виробництва енергії необхідні гнучкі маневрені потужності для балансування енергосистеми. За досвідом найбільш розвинених енергосистем, потужність засобів балансування повинна становити 25–30% від встановленої потужності ВДЕ, що працюють у принципово новому режимі, який можна охарактеризувати як режим компенсацією похибки прогнозування [21, 24]. Цей режим не пов'язаний з циклічністю добового споживання чи з аварійними ситуаціями в енергосистемі, а лише з непередбачуваністю відхилень фактичного виробництва сонячної та вітрової енергії від прогнозованих значень. Енергосистеми мають стати більш гнучкими з метою швидкого реагування на несподівані ситуації. На сьогодні можна виділити чотири типи джерел гнучкості [1, 6, 8, 21, 24]: генерація (ГЕС і маневрені ТЕС), мережеві рішення (інтерконектори для перетоків між країнами та концепції Smart Grid), гнучкість попиту (коли споживачі регулюють своє навантаження) і технології накопичення енергії (ГАЕС, батареї). Кожен з цих типів джерел гнучкості має свої переваги, тому найкращого результату можна досягти оптимальною комбінацією різних джерел.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА МЕРЕЖАМИ

Нові джерела енергії і необхідність покращення контролю за станом мереж призводять до необхідності формувати клієнтоорієнтовані енергетичні мережі, що має базуватися на такому явищі як дигіталізація [7 – 10]. Так, електромережеві компанії сьогодні стикаються з серйозними змінами в операційній роботі, що викликано стрімким зростанням числа розосереджених джерел енергії (Distributed energy resources, DER), таких як сонячні фотоелектричні панелі, накопичувачі енергії, електромобілі і підключені до мережі домашні пристрої [1, 10 – 16]. Ще однією причиною змін енергетичної інфраструктури є проблеми старіння і зносу мережевого господарства.

Дигіталізацію визначають важливою частиною архітектури четвертої промислової революції «Індустрії 4.0» (*нім.* – Industrie 4.0, *англ.* – Industry 4.0) [7 – 10]. Частиною цифрової економіки безумовно є цифрова енергетика. Очевидно, що в розумінні «цифрова енергетика» дигіталізація не тотожна автоматизації, не означає лише можливість оперувати великою кількістю даних. Більшість досліджень визначають дигіталізацію в енергетиці як новий формат комплексного керування роботою електроенергетичних систем, що забезпечує векторну оптимізацію технологічних і бізнес-процесів для досягнення цільового стану електроенергетики, реалізацію нових технологій економічної взаємодії суб'єктів галузі. При цьому актуальною постає задача інтеграція бізнес-додатків і технологічних інформаційно-комунікаційних систем, що дозволяє [1 – 3, 6, 17, 18]:

- 1) підвищити надійність мереж та якість обслуговування споживачів;
- 2) оптимізувати інвестиції в розвиток електричних мереж та підвищити віддачу від інвестиційних проєктів за рахунок планування перспективного розвитку мережі з урахуванням;
- 3) оперативно формувати управлінську звітність у будь-якому розрізі на основі даних як бізнес-додатків, так і технологічних інформаційних систем, зокрема, оцінка ефективності інвестицій у нове обладнання та капітальне будівництво, у тому числі на основі зіставлення витрат (дані з бізнес-додатків) і кількісних індексів CAIDI, SAIDI, CAIFI, SAIFI тощо.

Як наслідок, побудова Smart Grid постає як складне завдання, що починається з детальної кількісної оцінки вимог до системи, визначення фактичних цілей і необхідних для їх досягнення рівнів функціонування, та супроводжується описом основних концепцій системи і використовуваного обладнання. На сьогодні власне розвиток енергетики має розглядатися із врахуванням наступних драйверів [1, 3 – 7, 10, 13, 14].

Інтернет енергії. Нові конфігурації енергосистем у багатьох дослідженнях отримали назву Інтернет енергії (Internet of Energy, IoE). Енергетика нового покоління – це енергетика, де нове підключення до мережі можна отримати так само легко і швидко, як підключення до Інтернету – за принципом plug & play. З'являється можливість миттєво змінювати вимоги до надійності, зокрема, отримувати додаткову надійність чи продавати надлишковий резерв електроенергії, коли в ньому немає необхідності. Енергія має стати «мобільною» та бути доступною в будь-якій точці, як мобільний Інтернет.

Розосереджена енергія. Поняття дигіталізація в енергетичній сфері, як правило, розглядають у зв'язку з розосередженою енергетикою. Розосереджена енергетика активно розвивається в світі в останні роки, оскільки має місце суттєве здешевлення технологій. Проєкти на меншу потужність в перерахунку на

кіловат-годину на всьому життєвому циклі стають все більш вигіднішими. До технологій розосередженої енергетики / розосереджених енергоресурсів (Distributed Energy Resources, DER) в світовій практиці відносять: розосереджену генерацію (Distributed Generation); керування попиту (Demand Response); керування енергоефективністю; мікромережі (Microgrids); розподілені системи зберігання електроенергії; електромобілі.

Якщо обсяги світового ринку технологій РГ в 2015 році, за оцінками компанії BCC Research, становили 65,8 млрд. дол., то прогнозується, що до 2021 року цей ринок зросте до 106 млрд. дол.

Промисловий Інтернет речей (Industrial Internet of Things – IIoT) – багаторівнева система, що включає датчики і контролери, встановлені на вузлах і агрегатах промислового об'єкта, засоби передачі даних та їх візуалізації, потужні аналітичні інструменти інтерпретації одержуваної інформації тощо.

Єдина інформаційна платформа. Для підвищення ефективності дигіталізації важливо використовувати всі інформаційні дані, які виробляє кожен об'єкт електроенергетики. Дигіталізація повинна зробити всі дані, які ще не використовуються на енергооб'єктах (до 98%), доступними для аналізу, щоб на їх підставі здійснити більш якісні та оперативні управлінські рішення. Першим кроком є формування єдиного протоколу представлення в енергосистемі даних всіма її учасниками, зокрема, при забезпеченні горизонтальної та вертикальної інтеграції потоків інформації, тобто формування єдиної цифрової платформи.

Орієнтація на ризик. У електроенергетиці важливо впровадити ризик-орієнтоване керування. Прикладом такого підходу до керування активами енергокомпаній є система прогнозування технічного стану обладнання (предикативна аналітика), що дозволяє спрогнозувати відхилення в роботі обладнання і запобігає аварійні ситуації. Системи прогнозування стану енергетичного устаткування перетворюють потік технологічної інформації у важливі для менеджменту відомості. Отримуючи дані в режимі онлайн, система за допомогою цифрового моделювання на базі інтелектуальних математичних алгоритмів виявляє небезпечні тенденції в момент їх зародження, за два-три місяці до аварії або поломки. Застосування технологій прогнозування не тільки підвищує надійність обладнання, але й дозволяє контролювати підрядників і власний персонал, аналізувати ефективність роботи установок.

Клієнтські сервіси. Цифровими клієнтськими сервісами можуть стати «інтелектуальні» контракти, системи інтерактивного обслуговування, різні пакети тарифів на оплату електроенергії. Прикладом такого клієнтського сервісу є підключення активних споживачів до балансування енергосистеми, зокрема, Demand Response.

Агрегатор попиту і пропозиції – організація, що забезпечує одночасне керування електроспоживачими обладнанням декількох споживачів і бере участь з їх сумарним обсягом споживання на оптовому ринку електроенергії, потужності і системних послуг [1, 4, 5]. Одна з першочергових завдань – створення умов для появи організацій-агрегаторів і інших сервісних організацій у сфері інтелектуальної енергетики. У світовій практиці останнім часом керування попиту стало повноцінним інструментом забезпечення балансу попиту та пропозиції в енергосистемах. Значний потенціал керування попиту зосереджений у середніх і малих споживачів роздрібного ринку, а також в побутовому секторі. Агрегатори – це учасники ринку електроенергії, керуючі зміною навантаження групи споживачів з метою продажу сукупності регульованих здібностей цих споживачів на оптовому ринку (також можливий продаж на ринку системних послуг). Агрегатори навантаження можуть бути незалежними компаніями або постачальниками електроенергії, тобто збутовими компаніями.

Нова роль такого суб'єкта ринку полягає в тому, що він формує пул споживачів, потенційно здатних без шкоди для свого технологічного циклу змінювати споживання, проводить оцінку наявних у споживачів можливостей розвантаження, розробляє ефективні алгоритми участі в програмах керування попиту, оснащує споживачів необхідними засобами автоматизації, приладами обліку та іншими пристроями. Для безпосередньої участі агрегаторів навантаження (у тому числі незалежних) у роботі оптового ринку розробляється відповідна нормативна документація

Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок трьох базових компонент, характеристика яких наведена в табл. 1 [1, 6, 7, 8, 13]. Зважаючи на вище викладене, інтелектуальній електроенергетиці (побудованій згідно положень концепції Smart Grid) мають бути притаманними такі властивості [1, 6, 7]:

– мінімальні обмеження для інтеграції через загальну електричну мережу і загальний електричний режим будь-яких типів об'єктів виробництва, накопичення та споживання електроенергії, оптимального використання доступних джерел енергії на основі централізованої та розосередженої генерації;

– максимальна спостережуваність стану мережі та системи в цілому, гнучкість (адаптивність) функціонування і розвитку, прогнозування стану в умовах високої невизначеності режимів, зміни технологічної та просторової структури виробництва і споживання електроенергії під впливом технологічних та економічних (ринкових) чинників;

– орієнтованість на клієнта, тобто пріоритетність індивідуальних вимог споживачів до ефективності,

надійності та якості енергопостачання, що передбачає врахування їх інтересів і стратегій поведінки, активну участь у ринковій конкуренції, формування еластичного ринкового попиту на електроенергію, системні та мережеві послуги.

Таблиця 1 – Базові компоненти розвитку електроенергетики

Назва компоненти	Характеристика компоненти
Підвищення рівня автоматизації.	Забезпечує більшу оперативність реакції технічних пристроїв і систем, суб'єктів ринку на швидко змінювані зовнішні в темпі реального часу.
Підвищення рівня інформатизації.	Забезпечується за рахунок зростання обсягів і швидкості передачі даних, досягнення нового рівня в спостережливості і контролю стану, в керованості режимів роботи окремих технічних пристроїв і енергосистеми в цілому, в інформаційній прозорості механізмів конкурентного ринку для всіх його суб'єктів.
Підвищення інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями.	При нових рівнях інформатизації та автоматизації цей компонент забезпечує не тільки «реакцію по фактичному стану», а й «реакцію за прогнозом», виходячи з оцінки ймовірних змін виробничих параметрів окремих пристроїв, технічних систем, ринкової кон'юнктури.

Цінність побудови енергетичних систем на основі концепції Smart Grid полягає в тому, що підприємства електроенергетики зможуть «згладити» потреби в електроенергії у моменти максимального навантаження, відмовитися від використання гарячих резервів і знизити потребу в довгострокових капіталовкладень у створення додаткових генеруючих підприємств, а також скоротити необхідність інших інвестицій. Як приклад ключові елементи інтелектуальної електромережі згідно рекомендацій компанії Cisco зведено в табл. 2 [14]. Наявність чотирьох характеристик, наведених в табл. 2, разом узятих фактично робить енергосистему інтелектуальною.

Сьогодні пріоритетними постають наступні напрямки реалізації нової технологічної парадигми в енергетиці [1 – 7, 17 – 19]:

- 1) відкриті модульні цифрові платформи для організації кіберфізичних систем і середовищ в електроенергетиці;
- 2) інтелектуальні мультиагентні системи керування;
- 3) системи зберігання електроенергії (від акумуляторів для електромобілів і побутового сектора до систем зберігання електроенергії великої місткості, у т.ч. технології зберігання електроенергії у водневому циклі);
- 4) перспективна високовольтна і високочастотна силова електроніка;
- 5) технології «Інтернету речей» (цифрові датчики, сенсори, актуатори і засоби комунікації);
- 6) цифрові фінансові технології (блокчейн, смарт-контракти, децентралізовані автономні організації).

Таблиця 2 – Ключові елементи інтелектуальної електромережі згідно рекомендацій компанії Cisco

Елемент	Характеристика елемента
Прозорість роботи.	Повне уявлення про стан енергосистеми – передача даних лічильників, вимірювачів і команд керування.
Можливість керування.	Переведення енергосистеми у будь-який потрібний стан.
Автоматизація.	Швидка адаптація до змінних умов без втручання користувача.
Інтеграція.	Підключення систем і процесів підприємства електроенергетики – висока інтелектуальність і ефективність енергосистеми.

Проведений аналіз дозволив визначити базові складові сучасної технологічної платформи реалізації концепції Smart Grid:

- 1) силова електроніка (FACTS / HVDC);
- 2) системи керування енергоспоживанням (EMS);
- 3) автоматизація та захист «інтелектуальних» (цифрових) підстанцій;
- 4) інтегрований моніторинг стану підстанцій (ISCM);
- 5) комунікаційні рішення;
- 6) система керування розподілом / розподільними мережами (DMS);
- 7) автоматизація та захист розподілу / розподільними мережами енергії;

- 8) розосереджені енергетичні ресурси (DER);
- 9) система керування децентралізованою енергією (DEMS);
- 10) інтелектуальні датчики та лічильники Smart meter;
- 11) широка інтеграція ВДЕ в мережі та енергосистеми;
- 12) технічні рішення акумулювання (збереження) енергії.

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ

В залежності від типу керованої мережі (Network Manager) – мережа передачі чи розподілу – можна виокремити системи керування передачею електроенергії (TMS) і системи керування розподілом електроенергії (DMS) [1, 11, 12, 16, 20]. До скасування державного регулювання системи керування енергоспоживанням (EMS) використовувалися, в основному, для комплексного керування виробництвом і передачею електроенергії. Після скасування державного регулювання поділ цих двох функцій призвело до створення систем керування виробництвом електроенергії (GMS) для незалежного керування генеруючими потужностями.

Компанія Newton-Evans опублікувала результат дослідження по застосуванню різних автоматизованих систем енергетичними компаніями з 25 країн світу [23]. Це масштабне дослідження проведено на підставі опитувань, що проводяться Newton-Evans з 1984 року. Згідно з результатами опитування, SCADA-системи експлуатують всі компанії, в той час як систему керування енергоспоживанням (EMS) є тільки в 74% опитаних компаній. Системи керування розподільними мережами (DMS) використовуються в 52% компаній, а системи керування відключеннями (OMS) – 62%. З точки зору застосовуваного обладнання впевнено лідирує компанія GE (включаючи Alstom Grid), слідом йдуть ABB і Siemens. У той час, як майже 2/3 опитаних компаній планують оновити свої SCADA-системи, 29% планують ввести в експлуатацію нові системи EMS і DMS.

Серед опитаних компаній 40% заявили, що розосереджені джерела енергії (DER) інтегровані в їх SCADA-системи, а 47% планують інтегрувати їх в найближчі кілька років. У Північній Америці 82% компаній планують в майбутньому інтегрувати DER в свої SCADA-системи, однак вони ще не впроваджені. Майже 34% опитаних компаній у світі вказали, що вони об'єднали в своїх системах функції SCADA / DMS і OMS. При цьому 28% не планують цього робити, як і половина північноамериканських компаній. В останні роки компанії стали приділяти більше уваги кібербезпеці. Більше половини респондентів використовують сервіси сторонніх компаній для кіберзахисту своїх об'єктів, а 48% вдаються до сторонньої допомоги для захисту критичної інфраструктури і оцінки вразливості. При цьому 23% компаній проявили інтерес до впровадження хмарних технологій на своїх об'єктах. Крім того, частка компаній, що використовують програмне забезпечення для збору даних про відключення збільшилася з 29% до 69% [23].

Системи керування розподільними мережами (distribution management system, DMS) і системи обробки відключень (outage management system, OMS) з плином часу зазнали схожі зміни, значною мірою завдяки розвитку обчислювальної техніки [1, 4, 5, 10, 16, 20]. Розвиток систем DMS починалося з доповнень до систем SCADA / EMS, адаптованих до рівня розподільних систем, а також з автономних систем. Відмінність таких систем від їх аналогів з магістральних мереж полягає в додаткових прикладних функціях, специфічних для розподільних мереж.

Цілі інтеграції систем SCADA / EMS з раніше незалежними засобами керування розподільними мережами та обробки відключень багатогранні. Рішення представляється у вигляді засобу, що забезпечує цілу низку функціональних удосконалень, які, в свою чергу, позитивно позначилися б на функціонуванні системи:

- інтегроване керування операціями (при збереженні всіх експлуатаційних даних в одній системі різними суб'єктами (наприклад, співробітники пункту управління, виїзний персонал, конструкторський відділ) можуть використовувати в роботі одне джерело даних);
- аналіз зв'язності (завдяки більш повного і глибокого аналізу керування великими і різномірними електричними мережами може бути більш точним, ефективним і безпечним);
- підвищена продуктивність праці (співробітники енергетичної компанії можуть витратити менше часу на збір інформації та більше – на її використання);
- інтеграція даних в масштабі підприємства (можуть бути вдосконалені інформаційні потоки між споживачами, відділом експлуатації, конструкторським відділом і керівництвом);
- миттєве охоплення стану мережі (енергетичні компанії можуть отримати набагато більш повне уявлення про стан системи в будь-який момент часу);
- оптимізація роботи мережі (система енергопостачання може експлуатуватися найбільш ефективним чином з технічної точки зору). Детально розглянемо особливості побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS) {інше позначення: Distributed Energy Resource Management System (DERMS)} [1, 4, 5, 16, 20].

Таблиця 3 – Функції DEMS

№ з/п	Функція DEMS	Характеристика функції DEMS
1	Функція планування.	Розглядають на періоді часу від одного до семи днів з тимчасовим дозволом в залежності від розрахункового періоду продажу і покупки енергії, наприклад, 15, 30 або 60 хв. Функція прогнозу погоди DEMS забезпечує імпорт / розрахунок даних прогнозу погоди, які використовуються в якості вхідних даних для інших функціональних модулів DEMS. Функція прогнозу погоди має можливість імпорту прогнозу метеорологічних даних із зовнішніх джерел, наприклад, метеорологічних служб. За допомогою алгоритму корекції ковзним середнім мінімізується різницю відхилення між зовнішнім прогнозом і локально обмірюваними фактичними метеорологічними даними.
2	Функція прогнозу навантаження.	Забезпечує розрахунок для декількох класів навантаження. Основні дані – це безперервні історичні дані вимірюного навантаження з дозволом, відповідним функції планування.
3	Функція прогнозу генерації.	Обчислює очікувані обсяги генерації ВДЕ, в залежності від прогнозованих погодних умов. В якості алгоритму прогнозування використовується кусково-лінійне перетворення двох метеорологічних змінних в очікувану потужність згідно матриці перетворення (наприклад, швидкість і напрямок вітру для вітрових силових агрегатів, інтенсивності світла і температура навколишнього повітря для фотоелектричних систем). Матриця перетворення може бути налаштована відповідно до технічних специфікацій установки та / або оцінки на основі історичних свідчень потужності і метеорологічних вимірювань шляхом застосування нейромережових алгоритмів (в кроці автономного аналізу).
4	Функція диспетчерських графіків.	Обчислює оптимізовані графіки (включаючи зобов'язання) для всіх установок, які адаптуються, таких як контракти, енергоблоки, сховища і гнучкі вимоги. Функція цілі полягає в різниці доходів за вирахуванням витрат, прибутку. Планування враховує параметри елементів моделі і їх топологічні зв'язки, які визначають фінансову інформацію, а також технічні, екологічні та договірні параметри і обмеження віртуальної електростанції.
5	Функція керування виробництвом електроенергії.	Передбачає контроль і нагляду за всіма генеруючими потужностями і обладнанням акумуляції VPP. Залежно від режиму керування відповідного блоку (незалежний, ручний, за розкладом або режим керування) і параметрів блоку (мінімальна / максимальна потужність, градієнт потужності, енергоємність), фактичного стану (в роботі, в очікуванні, віддалений запуск, дистанційне керування, збій) та фактичної потужності блоку, розраховуються команди на пуск / зупинка та уставки потужності для блоків, що передаються через командний інтерфейс.
6	Функція керування споживанням електроенергії.	Передбачає контроль і спостережуваність за всім гнучким навантаженням VPP. Клас гнучкого навантаження може містити один або кілька груп навантаження з однаковим пріоритетом, коли одна група навантаження може бути включена або виключена повністю за допомогою однієї комутаційної команди. Залежно від режиму керування класу навантаження (незалежний, за розкладом або в режимі керування) і фактичного комутаційного стану, стану фактичного елемента керування, фактичного енергоспоживання і допустимого часу керування груп навантаження, розраховуються необхідні команди на перемикання для забезпечення уставки загального навантаження і передається через командний інтерфейс (застосовується циклічне відключення навантаження групи навантаження одного класу).
7	Функція моніторингу енергообміну.	Обчислює очікуване відхилення узгодженого графіка обміну енергією в поточний обліковий період (15, 30 або 60 хв.) і значення необхідної корекції потужності для підтримки обміну за графіком. На основі фактичного енергоспоживання в поточному звітному періоді та фактичною тенденцією обміну потужності, в кінці звітного періоду розраховується передбачувана енергії обміну. Різниця між цим значенням і значенням узгодженого обміну, поділене на час, що залишився звітного періоду, дає значення необхідної загальної корекції потужності, яка необхідна для підтримки графіка узгодженого обміну в кінці розрахункового періоду. Це значення передається функції оптимізації і координаті в реальному часі для подальшої обробки.
8	Функція оптимізації та координації в реальному часі.	Відправляє загальне значення корекції енергії на всі окремі блоки генерації електроенергії, пристрої зберігання і гнучкі класи керованих навантажень.

Паралельно з лібералізацією енергетичних ринків, децентралізація виробництва електроенергії, тепла і холоду реалізуються в рамках концепції віртуальної електростанції (virtual power plant, VPP) [1, 4, 5, 16, 20]. VPP являє собою сукупність малих і дуже малих децентралізованих генераторів електроенергії,

контрольованих і керованих системою керування виробництвом і розподілом енергії більш високого рівня. Успішна робота VPP вимагає наступного технічного обладнання:

- 1) системи керування виробництвом і споживанням енергії, яка відстежує, планує і оптимізує роботи децентралізованих силових агрегатів;
- 2) системи прогнозування навантаження, яка здатна розраховувати дуже короткострокові (до 1 год.) і короткострокові прогнози (до 7 днів);
- 3) системи прогнозування виробництва ВДЕ з використанням прогнозу погоди, щоб передбачити продуктивність вітряних електростанцій і сонячних батарей;
- 4) системи керування енергетичними даними, яка збирає та архівує дані, які потрібні для оптимізації та прогнозування, наприклад, профілів виробництва і навантаження, а також контрактних даних для постачання споживача;
- 5) потужного інтерфейсу зв'язку системи керування виробництвом і споживанням енергії з децентралізованими силовими агрегатами.

Для функціонування VPP потрібний двонаправлений зв'язок між децентралізованими силовими агрегатами генерації електроенергії і центральною системою керування виробництвом і споживанням енергії.

Для операційного планування та складання диспетчерських графіків потрібні досить точні прогнози. Для параметрування прогнозу використовується кілька операційних показників, зокрема таких, як середня похибка прогнозу на добу або абсолютна похибка на добу або на періоді прогнозування. Залежно від основної мети VPP, вимоги до методів прогнозування можуть змінюватися. Якщо основна мета полягає у зниженні пікового навантаження або балансуванні енергії, прогноз повинен бути дуже точним у піковий час або час з високими цінами на балансуєчу енергію. Алгоритми прогнозування повинні вміти швидко пристосовуватися до нових ситуацій.

На основі результатів роботи алгоритмів прогнозу і фактичного стану VPP, навантаження у зоні відповідальності може забезпечуватися за допомогою децентралізованих силових агрегатів чи існуючих енергетичних контрактів.

Особливості роботи DEMS проаналізуємо на прикладі системи компанії Сіменс [20]. Система DEMS не призначена бути заміною для всього можливого устаткування автоматизації, необхідного для функціонування компонентів VPP. Повинно працювати, по крайній мірі, локальне устаткування автоматизації, яке буде реалізовувати основні операції децентралізованих силових агрегатів для забезпечення безпеки компонента і особистої безпеки під час відсутності системи DEMS.

Компоненти / блоки VPP і графік їх енергетичного потоку моделюються в DEMS в окремих класах елементів моделі, наприклад, конвертер одиниць, контракти, одиниць зберігання, відновлювані станції і гнучкі навантаження.

Додаток планування DEMS компанії Сіменс моделює всі витрати / доходи і потоки енергії та теплоносія з урахуванням обмежень, незалежно від їх типу (наприклад, електроенергію, гаряча вода, пар, охолодження, викиди, водень). Додатки керування DEMS забезпечують контроль і нагляд за потужністю всіх генераторів електроенергії, обладнанням зберігання і гнучким попитом, а також можливістю керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією.

Функції DEMS можна розділити на функції планування і функції керування. Наприклад, до відповідних функцій планування відносяться прогноз погоди, прогноз навантаження, прогноз виробництва та зобов'язання групи. DEMS забезпечує не тільки керування виробництвом і споживанням енергії, а також контроль, оптимізацію і координацію в реальному часі. Характеристика даних функцій наведена в табл. 3.

КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Система керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS) активно знижує піковий попит на електроенергію, оптимізує мережеві активи, одночасно допомагаючи розподільним мережам постачати електроенергію більш ефективно, надійно, безпечно та економічно. Всі типи систем керування мережами використовують в якості базової платформи системи SCADA для диспетчерського керування та збору даних, функціонал яких сьогодні розширюється додатковими компонентами і додатками [1, 11, 12, 16, 20]. Спектр функцій для побудови систем керування виробництвом, передачею та розподілом електроенергії зведено в табл. 4 [7, 11, 12, 16, 20].

Має бути доступними також ще низка компонент функціонування системи, які використовуються і налаштовуються відповідно до завдань і розмірності системи керування. Характеристика таких компонент зведена у табл. 5.

Так, корпорація Oracle представила Oracle Utilities Network Management System, вдосконалену платформу керування мережами, яка дозволяє електромережевим компаніям здійснити перехід до клієнтоорієнтованої енергетичної мережі [22].

Платформа надає диспетчерам можливості для моніторингу стану всіх їх мережевих і лінійних активів у режимі реального часу. Платформа Oracle Utilities Network Management System дозволяє мережевим компаніям агрегувати інформацію про різні мережеві активи в єдиний інтерфейс з більш

детальним відображенням поточного функціонування мережі.

Таблиця 4 – Функції системи керування розподілом електроенергії

№ з/п	Функція	Характеристика функції
1	Керування техобслуговуванням та аварійними відключеннями.	Обробка звітів про аварійні відключення; планування і моніторинг перемикачів; корекція помилок.
2	Керування мережами передачі.	Оцінка стану; розрахунок поточного розподілу / струмів короткого замикання; аналіз наслідків аварій.
3	Керування розподільними мережами.	Ізоляція аварій та відновлення енергопостачання; розрахунок поточного розподілу / струмів короткого замикання; експертна система.
4	Керування даними про електроенергії.	Керування диспетчерським графіком; прогнозування навантаження / генерації; архівування; складання звітів.
5	Керування навантаженням.	Керування навантаженням для електроенергії та газу; керування навантаженням для водопостачання.
6	Керування для виробництва електроенергії.	Автоматичне керування виробництвом з регулюванням частоти і активної потужності; додатки планування.

Вперше мережеві компанії отримують інформацію про мережеві активи – двосторонню інформацію про розосереджені джерела енергії (Distributed Energy Resource, DER), інформацію про інфраструктуру інтелектуального обліку (Advanced Metering Infrastructure, AMI), дані систем керування розподілом потоків потужності в мережі (Distribution Management System, DMS) і дані систем керування аварійними відключеннями (Outage Management System, OMS) – у вигляді єдиного інтерфейсу для більш змістовного аналізу і прийняття обґрунтованих рішень.

Таблиця 5 – Компоненти, які використовуються і налаштовуються відповідно до завдань і розмірності системи керування

№ з/п	Компонента	Характеристика компоненти
1	Кооперативне керування системою з декількох розподілених центрів керування.	Забезпечує гнучку та динамічну роботу системи керування в розподіленій конфігурації.
2	Система архівної інформації.	Забезпечує архівування та подальше відновлення технологічних даних.
3	Прогнозування.	Забезпечують довгострокове, середньострокове і короткострокове прогнозування завантаження системи.
4	Планування потужності.	Забезпечує оптимальне планування ресурсів генеруючих потужностей, включаючи зобов'язання і плановані поставки.
5	Регулювання потужності.	Забезпечують моніторинг і контроль, тобто диспетчеризацію в реальному часі генеруючих потужностей, що беруть участь в регулюванні частоти.
6	Програми для мереж передачі.	Забезпечують швидкий комплексний аналіз і оптимізацію роботи передавальної мережі.
7	Керування відключеннями.	Забезпечує ефективне керування плановими і аварійними відключеннями в розподільних мережах.
8	Програми для розподільних мереж.	Забезпечують швидкий комплексний аналіз і оптимізацію роботи розподільчої мережі.
9	Програми експертної системи.	Підтримує оператора в важливих і складних завданнях у сфері усунення неполадок розподільної мережі.

Удосконалена платформа надає мережевим компаніям можливості моніторингу, які їм необхідні для відстеження та реагування на зміни стану мереж. Серед нових функцій розробленої Oracle галузевої платформи – мобільний інтерфейс, який дозволяє диспетчерам оперативно зв'язуватися і взаємодіяти з виїзними ремонтними бригадами, щоб прискорити усунення неполадок. Платформа містить функції безпеки, які попереджають диспетчерів про небезпечні роботи на розподільній мережі, викликаних функціонуванням РГ.

У Oracle Utilities Network Management System забезпечується повний моніторинг стану розподільної мережі за допомогою інфраструктури інтелектуального обліку, розподілених датчиків, геоінформаційної системи (GIS), системи диспетчеризації та збору даних (SCADA), датчиків стеження за погодними умовами та інших кінцевих пристроїв на єдиній платформі; масштабовану платформу, яка не обмежує мережеві компанії в їх подальшому розвитку; можливості для покращення показників надійності, зокрема, індексів

середньої тривалості переривання енергопостачання споживача (Customer Average Interruption Duration Index, CAIDI) та середньої тривалості переривань в роботі системи (System Average Interruption Duration Index, SAIDI) – навіть у процесі розвитку мереж; зниження витрат на відновлення енергопостачання, даючи можливість диспетчерам і виїзним ремонтним бригадам взаємодіяти у реальному часі за допомогою мобільного додатку, щоб оперативно усувати несправності; підтримку для операторів мереж газопостачання, водопостачання та електропостачання.

Нові функції Oracle Utilities Network Management System: покращені можливості оцінки збитку і керування в періоди несприятливих погодних умов, зокрема, визначення розрахункового часу відновлення (з метою більш точного інформування клієнтів); покращені можливості для диспетчера мережі в процесі підготовки системи енергопостачання до відключення на підставі знову отриманих даних від систем GIS, SCADA, AMI і систем стеження за погодними умовами; надання диспетчерам вдосконалених можливостей керування розподільними мережами, що покращують функції локалізації неполадок, перевантаження / відключення навантаження і профілювання навантаження.

Більш детально розглянемо особливості побудови та функціонування системи ETAP ADMS™, Розроблену компанією ETAP [16]. ETAP ADMS™ – це комбіноване рішення для планування та експлуатації при керуванні, контролі, візуалізації та оптимізації мережі розподілу електроенергії, що складається з:

- геопросторова інформаційна система (Geospatial Information System, GIS);
- електричні системи диспетчерського контролю та збору даних (Electrical Supervisory Control & Data Acquisition, eSCADA);

- система керування розподілом (Distribution Management System, DMS);
- розподілені мережеві додатки (Distribution Network Applications, DNA);
- система керування відключеннями (Outage Management System, OMS).

Характеристика системи керування розподілом електроенергії ETAP ADMS™:

1) масштабоване та модульне рішення для керування, контролю, візуалізації, оптимізації та автоматизації мереж розподілу від великих міст до сільських кооперативів;

2) інтегрована мережева модель для планування, захисту, надійності та операцій;

Інтуїтивно зрозумілий та зручний графічний інтерфейс користувача, який використовується операторами розподільної мережі (DNO), диспетчерами, інженерами по плануванню, аналітиками надійності та менеджерами;

3) розширена аналітика, включаючи оцінку стану розподілу, оптимізацію рівнів напруги та реактивної потужності, локалізація несправностей, відновлення ізоляції та відновлення обслуговування (FLISR), прогнозування відмов, прогнозування навантаження, уніфікований потік змінного та постійного струму, моделювання розосередженої генерації, захист, зниження навантажень тощо;

4) ситуаційна «інтелектуальність» забезпечує ефективний та надійний аналіз мережі та керування під час швидкої зміни стану мережі;

5) стандартизація з більшістю галузевих додатків та легка інтеграція із застарілим та стороннім програмним забезпеченням.

Система керування розподільними мережами ETAP ADMS™ являє собою інтелектуальне геопросторове рішення для розподільчих мереж, яке активно знижує пікове навантаження на систему, оптимізує мережеві активи, забезпечуючи значну ефективність передачі електричної енергії. Система керування розподілом побудована на існуючому та перевіреному рішенні ETAP Real-Time™ та інтегрується з GIS, eSCADA, OMS та іншими додатками, такими як автоматизоване зчитування вимірювань (Automated Meter Reading – AMR) та інформаційні системи клієнтів (Customer Information Systems – CIS). DMS надають розширені можливості підтримки прийняття рішень для безпечної та надійної роботи радіальних та замкнених розподільних мереж розподілу. Основні характеристики особливостей призначення ETAP ADMS наведені в табл. 6.

Наведемо характеристику окремих модулів ETAP ADMS™ [16].

1. Геопросторові електричні схеми

Модуль Геопросторові електричні схеми ETAP забезпечує редаговане середовище для електричних компонентів і з'єднань в поєднанні з геопросторовими даними. Геопросторові дані можуть бути імпортовані з багатьох систем сторонніх виробників або можуть бути змодельовані безпосередньо в геопросторових електричних схемах. Переваги електричних схем географічних інформаційних систем (ГІС): скорочення витрат на введення даних за допомогою ГІС-оновлених технічних даних для системних досліджень; автоматична корекція помилок напруги і струму дозволяє уникнути дублювання / неправильного введення даних; автоматичне створення баз даних електричного обладнання в оптимізованій базі даних; повний контроль результатів аналізу, що відображаються на схемі електричної схеми ГІС; гнучкість у використанні карт в якості фонових зображень для просторового інформування; гнучке використання всіх ETAP модулів для аналізу; багаторівневе графічне відображення даних ГІС та ETAP.

Таблиця 6 – Основні характеристики особливостей призначення ETAP ADMS

№ з/п	Призначення	Особливості
1	Мережевий зв'язок та аналіз топології.	Постійна обробка електричної топології системи на основі умов роботи в режимі реального часу.
2	Оцінка стану розподілу.	Висока оцінка стану продуктивності дистрибуції та нетехнічні розрахунки збитків, що зумовлюють незбалансований характер роботи розподільної мережі, а також зростаюче проникнення розосередженої генерації до розподільних мереж електроживлення.
3	Послідовність перемикачів та керування замовленими перемикачами.	Запит, побудова, перевірка, затвердження повного плану послідовностей комутації та виконання його «в один крок». Розширені можливості моделювання та прогнозування для незбалансованих мережевих фідерів із вбудованою логікою та процедурами керування системою.
4	Балансування подачі та мінімізація втрат.	Оптимізація розподілених перемикачів автоматично визначає оптимальну топологію системи для збалансування завантаження подачі та / або поєднання з мінімізацією втрат для усунення ненормальних умов роботи. Він забезпечує оптимальний стан існуючих комутаційних пристроїв і пропонує розташування нових відкритих точок зв'язку в системі.
5	Оптимізація напруги / реактивної потужності та консервативне зниження напруги.	ETAP VVO оптимально керує загальносистемними рівнями напруги та потоком реактивної потужності для досягнення ефективної роботи розподільної мережі, а також допомагає операторам розподілу зменшити втрати в системі, піковий попит або споживання енергії за допомогою методів CVR.
6	Локалізація несправностей, відновлення ізоляції та відновлення обслуговування.	ETAP FLISR знаходить ділянку мережі, яка буде ізольована через вимушене відключення, та надає інформацію оператору чи диспетчеру щодо замовника. FLISR має вирішальне значення для прийняття рішень в надзвичайних умовах і забезпечує спостережуваність надійності постачання.

2. Оцінка стану розподільної мережі

Здійснюється розрахунок несиметричного розподілу навантаження і нетехнічних втрат. У зв'язку з проникненням розосередженої генерації в розподільну мережу контроль мережі на підставі моделі реального часу з оцінкою стану розподілу відіграє основну роль в традиційних несиметричних розподільних мережах. Функція оцінки стану розподільної мережі використовує методи розподілу навантаження для видачі в реальному часі інформації про технічні та нетехнічні втрати.

Основні можливості оцінки стану розподільної мережі: оцінка індивідуальних навантажень на фідер з урахуванням класів навантаження, типу навантаження, кривої навантаження і вимірювань навантаження; інтегрованість з оцінкою стану ліній електропередач, надаючи уніфіковану і повну картину комплексної системи передачі і розподілу електроенергії;

Функція оцінки стану розподільної мережі може працювати в енергетичних мережах в режимах: з перевіркою або без перевірки телеметричних вимірювань; з ручною або автоматичною обробкою неспостережуваних частин мережі; з фіксованими вимірами або без них. Ця функція використовує архівні дані мережі, включаючи: денні профілі навантаження, що враховують типи, класи, дні тижня і погодні умови; пікові навантаження для розподільних трансформаторів і / або споживачів і / або ліній передачі. Вона враховує відсутність даних в режимі реального часу і компенсує їх історичними даними, псевдо- і віртуальними вимірами для отримання мінімального набору вхідних даних, необхідних для узгодженого розрахунку усталеного режиму.

3. Ізоляція коротких замикань і відновлення роботи

Модуль здійснює оптимальне відновлення роботи мережі. Модуль ETAP для виявлення коротких замикань і відновлення роботи знаходить ділянку мережі, який буде ізольований через вимушений відключення, і надає інформацію оператору або планувальником щодо порушених споживачів. Даний модуль може визначити оптимальну стратегію відновлення, яка буде використовуватися для відновлення максимальної кількості порушених споживачів без повторного виникнення несправності і перевантаження існуючих мереж.

4. Переключення системи керування замовленнями

Керування замовленнями на перемикачів ETAP (SOM) дозволяє диспетчерам енергосистеми, операторам та менеджерам запитувати, призначати, відстежувати та записувати робочі замовлення на комутацію. Використовуючи технологію на основі HTML5 для зв'язку з мобільними додатками, ETAP SOM з'єднує бригади з обслуговування та відключення роботи з центром керування для повного керування запланованими заходами в цій галузі.

5. Оптимізація комутації

Здійснюється балансування фідерів і мінімізація втрат. Модуль оптимізації послідовності перемикачів – це засіб, який автоматично визначає оптимальну конфігурацію системи для досягнення однієї або декількох цілей, поставлених користувачем. Він визначає оптимальний стан існуючих комутаційних пристроїв і рекомендує місця для установки нових точок секціонування системи. Модуль може використовуватися інженерами-проектувальниками або інженерами експлуатації для мінімізації втрат активної потужності в системі і пом'якшення або повного усунення аномальних умов експлуатації. Цей інструмент може застосовуватися для аналізу радіальних і петльових трифазних або однофазних енергосистем великої розмірності з різними типами профілів навантаження.

6. Блок контролю кількості спрацьовувань

Здійснюється планування технічного обслуговування обладнання на підставі контролю кількості спрацьовувань. Блок контролю спрацьовувань відстежує кількість спрацьовувань, виконаних кожним вимикачем, вимикачем конденсатора, пристроєм РПН, електроприводним ізолятором, вимикачами навантаження тощо, які контролюються системою.

7. Аналіз структури мережі

Здійснюється аналіз структури мережі в режимі реального часу та обробка топології мережі. Додатки Smart Grid для керування і автоматизації розподільних мереж базуються на точній моделі стану мережі. Модуль аналізу структури мережі в Real-Time (NCA) обраховує стан в реальному часі. Щоб оцінити і проаналізувати стан всієї електричної мережі, топологія мережі повинна бути доступна і постійно оновлюватися в режимі реального часу. Обробка топології мережі постійно зберігає і оновлює топологію електричної системи, таку як імпеданс ліній, навантаження, підключення, стан вимикачів тощо. Обробка топології мережі ЕТАР є основою для додатків реального часу, наприклад, оцінки стану розподільної мережі. Обробка топології мережі також забезпечує динамічний аналіз топології електричної мережі і повідомляє про умови експлуатації оператору. Дисплеї зі значними можливостями забезпечують швидку індикацію відключених споживачів та інших аномальних умов роботи мережі.

8. Інтелектуальний онлайн аналіз

Інтелектуальний онлайн аналіз є потужним аналітичним інструментом, який дозволяє прогнозувати поведінку системи у відповідь на дії оператора та події на підставі збережених даних і даних, що надходять в режимі реального часу.

Основні можливості функції інтелектуального моделювання: моделювання спрацьовування вимикача; визначення потенційних проблем в експлуатації; моделювання пуску двигуна і зміни навантаження; прогнозування часу роботи захисних пристроїв; прогнозування відгуку системи на дії оператора; реалізація сценаріїв «що – якщо»; моделювання на підставі архівних даних і даних, які надходять в реальному часі; допомога та навчання оператора. Використовується предиктивне моделювання, яке дозволяє уникнути непередбачених відключень підприємства, пов'язаних з людським фактором, перевантаженням обладнання тощо. Предиктивне моделювання надає середовище для ефективного навчання та підтримки операторів.

9. Оптимізація Вольт/ВАр (VVO) і консервативне зниження напруги (CVR)

Здійснюється мінімізація реактивних втрат і підвищення ефективності розподільчої мережі. Оптимізація Вольт/ВАр (VVO) керує рівнями напруги по всій мережі і реактивною потужністю при розрахунку усталеного режиму для досягнення ефективної роботи розподільної мережі. VVO допомагає диспетчерам розподілу знизити втрати системи, піковий попит або споживання енергії за допомогою методів зменшення напруги (CVR).

Оптимізація і Вольт/ВАр керування є функцією, яка визначає кращий набір контрольних дій для всіх пристроїв регулювання напруги і реактивної потужності для досягнення однієї або декількох зазначених робочих цілей без порушення будь-якого з основних експлуатаційних обмежень (межі високого / низького напруги, межі навантаження тощо). Оптимізація Вольт/ВАр включає функцію консервативного зниження напруги (CVR), яка використовується для розрахунку і підтримки допустимого напруги (наприклад, 220 В +/- 5%) на вході для всіх клієнтів, що обслуговуються фідером при всіх можливих умовах експлуатації. CVR використовується для вирівнювання профілів напруги і зниження загальної напруги системи під час перевищення заданих рівнів напруги згідно вимог ANSI або IEC. Загальна система попиту може бути знижена на коефіцієнт 0,7–1,0% на кожен 1% зниження напруги.

10. Керування послідовністю перемикачів

Модуль аналізу ЕТАР ArcFault™ обчислює обсяги енергії переключень для систем передачі і розподілу електроенергії. Конструктор послідовності перемикачів містить перелік комутаційних пристроїв і часи роботи вимикачів, роз'єднувачів навантаження і роз'єднувачів заземлення. Перед початком процесу моделювання будь-якої послідовності перемикачів додаток перевіряє відповідність послідовності безпечним процедурам перемикачів і запитує підтвердження в процесі моделювання кожного етапу перед переходом до наступного етапу, щоб уникнути випадкового перемикачів.

11. Аналіз прогнозу навантаження (контроль, прогнозування, керування)

Прогнозування навантаження є ідеальним інструментом для промислових підприємств, а також елементом для надійного і точного прогнозування майбутньої короткострокової навантаження в системі. Основні переваги прогнозування навантаження: адаптивне прогнозування навантаження шини; тренди в реальному часі; бібліотека профілів навантаження; архівація сценаріїв прогнозування; прогнозування завантаження до семи днів; прогнозування декількох графіків (режимів) навантажень; змінні користувачем погодні змінні і навантажувальні профілі; перегляд прогнозів на основі навантажувальних і погодних умов; бібліотеки профілів навантажень; імпорт і експорт даних з попередніх прогнозів.

12. SCADA & Monitoring для електричних мереж

SCADA & Monitoring, керований моделлю, забезпечує інтуїтивну візуалізацію і аналіз в реальному часі за допомогою інтелектуального графічного призначеного для користувача інтерфейсу, однолінійних схем, геопросторового вигляду та цифрових панелей моніторингу.

13. Система керування аварійними відключеннями

Інтегроване керування аварійними відключеннями і рішення для керування ремонтними бригадами, яке мінімізує збої в роботі з відключенням, забезпечуючи більш швидке виявлення і швидке відновлення завдяки розширеній ситуаційній обізнаності, автоматизації, а також ефективному і високоефективному використанню ремонтних бригад.

14. Моніторинг енергоспоживання та симуляторних процесів

Модуль моніторингу та моделювання електричних мереж ETAP (PSMSTM) лежить в основі системи керування електроспоживанням в реальному часі ETAP. Складові моніторингу енергоспоживання та розрахунку процесів: інтелектуальний моніторинг; інтуїтивний, інтелектуальний і інтегрований моніторинг в режимі реального часу з сучасним інтерфейсом; предиктивне моделювання; прогнозування поведінки системи у відповідь на дії оператора та події на підставі збережених даних і даних, що надходять в режимі реального часу; первинний енергооблік; детальне споживання енергії та аналіз витрат на основі тарифів на енергоносії і обміну інформацією про ринок електроенергії; прогнозування навантаження; прогнозування навантаження і передбачення трендів системи на основі алгоритмів, які адаптуються до вхідних змінних, зокрема, погодні умови.

Іншим прикладом ефективною реалізації ADMS для керування розподільними мережами є рішення компанії Schneider Electric (система SE ADMS) [12].

Ключовою особливістю системи SE ADMS є повна інтеграція п'яти абсолютно синхронізованих між собою систем на базі єдиної інформаційної платформи з єдиним призначенням для користувача інтерфейсом: системи керування розподілом енергії (Distribution Management System, DMS), системи керування аварійними і плановими відключеннями (Outage Management System, OMS), системи аналізу режимів роботи мереж високої напруги (Energy Management System, EMS) і системи диспетчерського керування та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA OASyS), геоінформаційної системи GIS (Geographic information system, GIS) [12].

При побудові системи використовується сервіс-орієнтований (Service-oriented Architecture, SOA) підхід, який полягає в модульній побудові самого програмного забезпечення, заснованого на використанні розподілених, змінних компонентах, оснащених стандартизованими інтерфейсами для взаємодії за стандартизованими протоколами. Даний підхід забезпечує підтримку кількох систем (технологічної системи, система діагностики, системи збору даних, навчальної системи та системи резервного копіювання), що працюють паралельно, де кожна система складається з набору сервісів, необхідних для успішної роботи всієї системи в цілому.

Важливим архітектурним аспектом є масштабованість системи. Систему SE ADMS можна розглядати в якості одного з основних блоків середовища інтелектуальних мереж, що надає послуги інтеграції на основі стандартів (наприклад, веб-сервіси), для забезпечення обміну даних з іншими корпоративними системами підприємства, такими як геоінформаційна система (Geographic information system, GIS), система інформації про споживачів (Customer Management System, CIS), система планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning, ERP), вдосконалена система вимірювання, збору і аналізу даних (Advanced Measurement Infrastructure, AMI) та інші.

Основними особливостями системи SE ADMS з функціональної і архітектурної точки зору є: масштабованість; висока продуктивність; безпека (система розроблена на безпечному міжплатформенному програмному забезпеченні); підтримка різних версій схеми мережі і графічних даних (даних відображення); можливість реалізації розподіленої архітектури; підтримка інтерфейсів на базі стандартів IEC 61970 та IEC +61968, які підходять для сценаріїв інтеграції на основі сервіс-орієнтованої архітектури; забезпечення повноцінного функціоналу архівування даних, тобто можливості зберігання, як телеметричних даних, так і результатів обчислень функцій DMS з аналізом трендів.

Система SE ADMS складається з трьох основних системних компонентів (підсистем) [12]: додатків графічного інтерфейсу користувача (Graphical User Interface – GUI) на рівні уявлення; додатків системи керування розподілом енергії (Distribution Management System – DMS) і служби реального часу розподіленої

системи диспетчерського керування та збору даних (Distributed Supervisory Control and Data Acquisition – DSCADA) на прикладному рівні; служб архівування на рівні бази даних.

Характеристики базових функцій SE ADMS зведені в табл 7.

Таблиця 7 – Характеристики базових функцій SE ADMS

№ з/п	Базова функція	Характеристика базової функції
1	Керування роботою мережі.	Відновлення електропостачання, відновлення електропостачання на великих ділянках, керування послідовністю перемикачів, керування відключеннями, показники роботи мережі, скидання навантаження, часові елементи, тренажер диспетчера.
2	Планування та оптимізація.	Регулювання реактивної потужності, регулювання напруг, реконфігурація мережі, оперативне прогнозування навантаження, короткотермінове прогнозування навантаження, керування навантаженням, покращення параспроможності мережі.
3	Аналіз роботи мережі.	Розрахунок втрат, аналіз надійності розрахунок струмів короткого замикання, перевірка характеристик вимикача, гармонійний аналіз, аналіз історії роботи системи.
4	Планування розвитку мережі.	Прогнозування навантаження, планування розвитку мережі, автоматизація мережі, оптимальне розміщення регуляторів напруги, підвищення надійності мережі.

Функції «керування роботою мережі» і «планування та оптимізація» в системі SE ADMS здійснюються в режимі реального часу, тоді як функції «аналіз роботи мережі» і «планування розвитку мережі» можуть здійснюватися в автономному режимі.

Отже, сучасні системи керування генерацією та розподілом електроенергії включають в себе набір засобів, що дозволяють операторам енергокомпаній не тільки ефективно керувати, але й виявляти, запобігати або усувати збурення в системі / мережі перш, ніж вони переростуть в масштабні аварії. Наступний етап у розвитку засобів контролю і керування для енергосистем – це реалізація групи технологій, відомих в цілому під назвою систем глобального моніторингу (WAMS, Wide Area Monitoring Systems) [1, 6, 10, 11, 20]. Вони не призначені для заміни систем SCADA / EMS / DMS або будь-яких інших прикладних систем, а скоріше служать доповненням до них. У WAMS застосовуються фазорні вимірювальні блоки, які синхронно у часі рееструють з високою точністю (до однієї мікросекунди) параметри мережі в найважливіших точках, розподілених по дуже великій площі. Системи WAMS можна розглядати як «міст» між великими ділянками мережі, аналогічний тому мосту, який будують між магістральними та розподільними мережами інтегровані системи класу Network Manager. Наприклад, компанія АББ вже почала розгортання WAMS на рівні електричних розподільних мереж. У найближчі роки WAMS, ймовірно, стануть невід'ємним елементом диспетчерських залів електричних мереж, а в подальшому – повністю інтегрованим елементом систем керування мережами.

ВИСНОВКИ

1. На сьогодні ми можемо констатувати поєднання трьох сегментів ринку: надійні та гнучкі мережі, інтелектуальна розосереджена енергетика і споживчі сервіси. А власне Smart Grid має розглядатися як інтегрована безпечна і надійна електроенергетична система, що охоплює генерацію, транспорт, розподіл та кінцеве споживання електричної енергії, ефективність якої забезпечується оперативним обліком енергоданих і ґрунтується на застосуванні передових засобів моніторингу, комунікації, аналізу та динамічного керування. Smart Grid набагато ширше, ніж технології чи комплекси технічних засобів, автоматизація системи чи розробка програмного продукту

2. Реалізація концепції Smart Grid неможлива без масштабного фізичного оновлення генеруючого і мережевого устаткування, забезпечивши керування технологічними процесами та економічними взаємодіями від локального до національного рівня. Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок підвищення рівнів автоматизації, інформатизації та інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями.

3. Вдосконалена система керування розподільними мережами (ADMS) – з передовим аналізом системи DMS для оптимізації роботи мереж в поєднанні з перевіреною на практиці системою SCADA для контролю і керування, системою EMS для роботи з мережами живлення, а також вбудованою системою

керування аварійними відключеннями для підвищеної відмовостійкості і надійності – надає електроенергетичним компаніям модульну і гнучку платформу, яка використовує стандартний інтерфейс, модель даних, інтеграційну мережу і захищену інфраструктуру.

4. Особливості реалізації складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами розглянуто на прикладі побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS), де здійснюється контроль і моніторинг потужності всіх генераторів електроенергії, обладнання зберігання і гнучким попитом, а також можливістю керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією, а також систем керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS), в яких забезпечується зниження пікового навантаження на систему, оптимізація мережевих активів, значну ефективність передачі та використання електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Денисюк С.П. та інш. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2019. – № 1. – С. 7–28.
3. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2014. – № 1(35). – С. 7–21.
4. Денисюк С.П., Соколовський П.В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // *Електрифікація транспорту*. – 2018. – № 15. – С. 31–42.
5. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем'єв М.В. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2018. – № 3. – С. 7–22.
6. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы // Кириленко О.В., Блинов И.В., Денисюк С.П. и др. / Под общ. ред. А.В. Кириленка. – К.: ИЭД НАН Украины, 2014. – 408 с.
7. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2014. – № 9 (том 2). – С. 82–94.
8. Мартынова А. Электроэнергетика 4.0: перейти на цифру // <http://atomicexpert.com/electricenergy40>.
9. Олійник Д.І. Міжнародний досвід фінансування сталого розвитку громад (на прикладі формування мережевої інфраструктури): аналіт. доповідь / Олійник Д.І. – К.: НІСД, 2017. – 48 с.
10. Орн М., Сен А. Сближение диспетчерских систем. Интеграция систем управления магистральными и распределительными сетями и систем обработки отключений // *АББ Ревю* 4/2005. – С. 30–32.
11. Решение АББ для распределительных цепей. – Каталог АББ, 2012. – 108 с.
12. Система SE ADMS – решение Schneider Electric для управления распределительными сетями. Техническое описание системы (Obzor-reshenia-ADMS-ot-shneider-electric-final DMS).
13. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid // Зб. «Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. випуск». – 2013, ІЕД НАНУ. – С. 5–12.
14. Типс Б., Тафт Дж. Концепция Cisco Smart Grid: Решения по автоматизации подстанций для диспетчерских служб. – Корпорация Cisco, 2010. – 9 с. (https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf)
15. Цифровой переход в электроэнергетике России // Под общей редакцией В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина; Москва, сентябрь 2017. – 47 с.
16. ADMS Advanced Distribution Management System Grid Modernization Redefined. Integrated Distribution Planning, eSCADA, DMS & OMS Solution 2017 ETAP / Operation Technology, Inc. B12-ETAPADMS-JAN2017 info@etap.com
17. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455-473.
18. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2016. – №4(46). – С.7–17.
19. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks // Strzelecki R. und Benysek G. – Springer, 2010. – 414 p.
20. Siemens Energy Sector. Справочник по энергетике // Издание 7.0 Управление электроэнергией 7.2 Продукты и решения в области управления электроэнергией (<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab5c1a35b3afe58903c604058a2aacb9cce464e6/version:1519821054/peg-part07-ru.pdf>)
22. Гнучкість та інтеграція відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс].– Режим доступу до

ресурсу: https://biz.censor.net.ua/columns/3131737/gnuchkst_ta_ntegratsya_vdnovlyuvanih_djerel_energ

23. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://docs.oracle.com/cd/E76909_03/PDF/NMS_V2_3_0_2_Configuration_Guide.pdf

24. Світ передачі та розповсюдження - нова стаття Чака Ньютона [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://newton-evans.com>

25. Гнучкість та інтеграція відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://lawmsb.com.ua/hnuchkist-ta-intehratsiia-vidnovliuvanykh-dzherel-enerhii/>

S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0002-6299-3680
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
R. Strzelecki, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0001-9437-9450
Gdańsk University of Technology, Gdańsk

FORMATION OF COMPONENTS OF SMART PLATFORM FOR THE MANAGEMENT OF POWER SYSTEMS AND NETWORKS

Features of implementation of the Smart Grid concept in modern energy systems and networks with consideration of modern energy drivers, in particular, Internet energy, Internet of things, dispersed generation, development of customer services and aggregators of demand and supply for electricity, are considered. The basic components of the development of the electric power industry have been evaluated taking into account the requirements of energy transition, digitalization of the economy, in particular, business applications and information and communication systems. The elements of the modern technology platform Smart Grid are given. An assessment of the peculiarities of the formation of an intelligent platform for the management of energy systems and electric networks for individual energy companies is given.

Features of construction of the Distributed Energy Management System (DEMS) are considered in detail. Features of DEMS are analyzed on the example of DEMS by Siemens. The planning and management functions of DEMS are considered. It is shown that DEMS controls provide control and monitoring of the power of all power generators, storage equipment, and flexible demand, as well as the ability to control to maintain a consistent electricity exchange profile.

The basic functions of the Distribution Management System (DMS) are presented. The control systems developed by Oracle, ETAP and Schneider Electric have been analyzed as components of the customer-oriented power distribution management platform. Here is a description of the individual ETAP ADMS modules and the basic SE ADMS features developed by ETAP and Schneider Electric, respectively.

Keywords: Smart Grid, power systems, power grids, intelligent control, decentralized power management systems, power distribution control systems.

REFERENCES

1. Bazyuk T., Blinov I., Butkevich O., Denysiuk S. et al. Intelligent Power Networks: Elements and Modes / By ed. acad. NAS of Ukraine O. Kyrylenko. – K.: IED of NAS of Ukraine, 2016. – 400 p.
2. Denysiuk S. Energy transition – requirements for quality changes in energy sector development // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2019. – № 1. – p. 7–28.
3. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2014. – № 1(35). – p. 7–21.
4. Denysiuk S., Sokolovskyi P. Analysis of the variable generation function on the step of transition to intellectual networks Smart Grid // Electrification of transport. – 2018. – № 15. – p. 31–42.
5. Denysiuk S., Tarhonskyi V., Artemiev M. Local electrical energy systems with active consumer: methods of construction and algorithm of their functioning // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2018. – № 3. – p. 7–22.
6. Intelligent electric power systems: elements and modes // Kyrylenko O., Blinov I., Denysiuk S. et al. / Ed. A. Kyrylenko. – K.: IED NAS of Ukraine, 2014. – 408 p.
7. Kyrylenko O., Denysiuk S. Current tendencies of construction and control of modes of electric power networks // Energy saving. Energy. Energy audit. – 2014. – No. 9 (Volume 2). – p. 82–94.
8. Martynova A. Electricity 4.0: switch to digital // <http://atomicexpert.com/electricenergy4.0>.
9. Oliynyk D. International experience in financing sustainable community development (for example, network infrastructure development): an analyst. report / Oliynyk D. – K.: NISD, 2017. – 48 p.
10. Orn M., Sen A. Approximation of control systems. Integration of backbone and distribution network management systems and shutdown processing systems // ABB Review 4/2005. – p. 30–32.

11. ABB solution for distribution circuits. – ABB catalog, 2012. – 108 p.
12. SE ADMS is a Schneider Electric solution for managing distribution networks. System Technical Description (Obzor-reshenia-ADMS-ot-shneider-electric-final DMS).
13. Stogniy B., Kyrylenko O., Denysiuk S. Development of Intelligent Electric Networks of Ukraine Based on the Provisions of the Smart Grid Concept // Coll. «Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Spec. output". – 2013, IED of NASU. – p. 5–12.
14. Tips B., Taft J. Cisco Smart Grid Concept: Substation Automation Solutions for Dispatch Services. – Cisco Corporation, 2010. – 9 p. (https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf)
15. The digital transition in the electric power industry of Russia // Under the general editorship of V. Knyaginina and D. Chalkin; Moscow, September 2017. – 47 c.
16. ADMS Advanced Distribution Management System Grid Modernization Redefined. Integrated Distribution Planning, eSCADA, DMS & OMS Solution 2017 ETAP / Operation Technology, Inc. B12-ETAPADMS-JAN2017 info@etap.com
17. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – p. 455-473.
18. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4(46). – p.7–17.
19. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks // Strzelecki R. und Benysek G. – Springer, 2010. – 414 p.
20. Siemens Energy Sector. Energy Reference // Edition 7.0 Electricity Management 7.2 Products and Solutions in the Field of Electricity Management (<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab5c1a35b3afe58903c604058a2aacb9cce464e6/version:1519821054/peg-part07-ru.pdf>)
22. Flexibility and integration of renewable energy sources [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: https://biz.censor.net.ua/columns/3131737/gnuchkst_ta_ntegratsya_vdnovlyuvanih_djerel_energ
23. [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: https://docs.oracle.com/cd/E76909_03/PDF/NMS_V2_3_0_2_Configuration_Guide.pdf
24. Transmission & Distribution World – New Article by Chuck Newton. Grid Modernization from an Energy Policy Perspective in 2019[Electronic resource] .- Mode of access to the resource: <https://newton-evans.com>
25. Flexibility and integration of renewable energy sources [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: <https://lawmsb.com.ua/hnuchkist-ta-intehratsiia-vidnovliuvanykh-dzherel-enerhii/>

Надійшла 21.10.2019

Received 21.10.2019

І.Ю. Бойко, аспірант, ORCID 0000-0002-8044-137X
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТАРИФІКАЦІЇ ДЛЯ ГЕНЕРУЮЧИХ СИСТЕМ MICROGRID

Електроенергетика України є технологічно складною, територіально розгалуженою системою, що поєднує електрогенеруючі станції, Об'єднану електроенергетичну систему (ОЕС) та розподільчі електричні мережі країни. Рівень розвитку електроенергетичного комплексу має визначальний вплив на стан економіки в державі, на вирішення проблем соціальної сфери і рівень життя людей. І не випадково енергетичну незалежність завжди пов'язують з національною безпекою держави. Електроенергетичний комплекс України був сформований як складова частина електроенергетичного комплексу ЄСРП і тому не в повній мірі відповідає вимогам до енергокомплексу незалежної держави. Потребує суттєвої зміни структура генеруючих потужностей. Стратегічною метою розвитку електроенергетичного комплексу є його докорінна перебудова на засадах новітніх технологій із забезпеченням маневреності, енергетичної та економічної ефективності, екологічної прийнятності, зовнішньої конкурентоспроможності та ринкових умов функціонування, що забезпечить стале, надійне, безпечне, якісне постачання електричної енергії галузям економіки і соціальної сфери країни. Регулювання ціни на енергоринку наразі відбувається в статистиці, що не дозволяє здійснювати оцінку динамічної зміни тарифної ціни електроенергії у локальних ізольованих системах. При стрибкоподібній зміні потужності ізольованої енергогенеруючої системи відбувається зміна тарифної ціни електроенергії, яка не може бути врахована при використанні статичних моделей. Для вищевказаного прикладу постає питання необхідності застосування моделей динамічної тарифікації, що включатимуть наявність перехідних процесів при зміні режимів роботи генератора та їх вплив на відхилення реальних значень економічних параметрів системи. Динамічний вплив електротехнічних параметрів генеруючої системи на економічні є визначним фактором для відмови від загальноприйнятої погодинної тарифікації у енергомережах України через її збитковість. Актуальним є використання моделі гнучкої динамічної тарифікації, що дозволить забезпечити адекватну тарифну ціну електроенергії.

Ключові слова: SmartGrid, енергогенеруюча система, статична тарифікація, динамічна тарифікація.

Вступ

Світовий досвід модернізації електромереж показав, що сучасна електрична мережа має інтегрувати різноманітні види генерації (у тому числі й малу генерацію) та багато типів споживачів для ситуаційного керування попитом на їх послуги; змінювати в режимі реального часу параметри і топологію мережі за поточними режимними умовами; забезпечувати розширення ринкових можливостей інфраструктури шляхом взаємного надання послуг суб'єктами ринку та інфраструктурою; мінімізувати втрати, розширювати системи самодіагностики і самовідновлення при виконанні умов надійності та якості електроенергії; інтегрувати електромережеву та інформаційну інфраструктури для створення всережимної системи керування з повномасштабним інформаційним забезпеченням; швидко змінювати керуючі впливи енергосистеми. Все це досягається за рахунок використання у енергосистемі пристроїв силової електроніки.

Одним із важливих завдань з оптимізації ОЕС України є питання тарифікації електроенергії, що буде взаємовигідною для виробників, постачальників та споживачів електричної енергії. Регулювання ціни на енергоринку наразі відбувається в статистиці, що не дозволяє здійснювати оцінку динамічної зміни тарифної ціни електроенергії у локальних ізольованих системах. При стрибкоподібній зміні потужності локальної енергогенеруючої системи відбувається зміна тарифної ціни електроенергії, яка не може бути врахована при використанні статичних моделей. Актуальним завданням є створення динамічної моделі, яка поєднує, з одного боку, енергетичні показники енергогенеруючої системи, а з іншого - економічні показники замкненої макроекономічної системи.

Мета та завдання

Метою роботи є аналіз моделі тарифікації електроенергії, прийнятої в Україні. Для усунення недоліків діючої статичної погодинної тарифікаційної моделі було поставлено завдання: провести аналіз існуючих моделей динамічної тарифікації.

© І.Ю. Бойко, 2019

Тарифікація в енергосистемі України

До травня 1995 в електроенергетиці України використовувалася регульована вертикально-інтегрована монополія. Указом Президента № 244/94 від 21 травня 1995 створено оптовий ринок електроенергії (ОРЕ), в основу якого покладено модель енергетичного пулу Англії та Уельсу [1]. В англо-уельській моделі оптового ринку електроенергії, прийнятої в Україні, суттєвим елементом є ринковий механізм ціноутворення на покупну електроенергію по годинах доби, реалізований на конкурентній основі через подачу цінових заявок і включення в диспетчерський графік енергоблоків ТЕС в міру зростання їхньої заявленої вартості. Розвиток конкурентних відносин в електроенергетичній галузі України пов'язаний із впровадженням моделі конкурентного ринку електроенергії, а саме ринку двосторонніх договорів та балансуєного ринку(БР) [2]. До основних сегментів ринку належать: ринок двосторонніх договорів, біржа електроенергії (ринок на добу вперед), балансуєний ринок та ринок допоміжних послуг, а також сегмент урегулювання небалансів купівлі-продажу електроенергії.

• **Двосторонні договори** укладаються між виробниками та постачальниками електроенергії та визначають умови, обсяги та ціни для учасників РДДБ.

• **Біржа електроенергії** є системою відносин між учасниками РДДБ та функціонує на основі механізму аукціону, дозволяючи скоригувати попит та пропозиції із закупівлі та виробництва електроенергії на добу наперед.

• **Балансуєний ринок електроенергії** є системою відносин між системним оператором і учасниками цього ринку, що функціонує у режимі, близькому до реального часу, з метою забезпечення фізичного та фінансового урегулювання небалансів електроенергії.

• **Ринок допоміжних послуг** існує задля придбання системним оператором допоміжних послуг, таких як регулювання частоти та активної потужності, регулювання напруги та реактивної потужності у об'єднаній енергосистемі України.

Середньозважена ціна, за якою оптовий ринок електроенергії купує електроенергію у виробників, формується на кожну годину майбутніх діб з урахуванням передбачуваної структури її виробництва на ТЕС, АЕС, ГЕС, ВЕС та інших виробниках [3]:

$$C_{op} = \frac{E_{TEC} \cdot C_{TEC} + E_{AEC} \cdot C_{AEC} + E_{GEC} \cdot C_{GEC} + E_{TELC} \cdot C_{TELC} + E_{BEC} \cdot C_{BEC} + E_{инш} \cdot C_{инш}}{E_{TEC} + E_{AEC} + E_{GEC} + E_{TELC} + E_{BEC} + E_{инш}}, \quad (1)$$

де $C_{GEC}, C_{TEC}, C_{BEC}, C_{инш}$ - контрактні закупівельні ціни на електроенергію у ГЕС, ТЕС, ВЕС та інших виробників, грн / МВт · год;

$E_{TEC}, E_{AEC}, E_{TELC}, E_{BEC}, E_{инш}$ - обсяги закуповуваної електроенергії у виробників в розрахунковий період, МВт · год.

Оптова ринкова ціна на постачання електроенергії формується погодинно і визначається як середньозважена, виходячи з собівартості закупівлі та розподілу електроенергії. Зокрема до уваги беруть такі компоненти:

- вартість електричної енергії всіх виробників, які продають електричну енергію на оптовому ринку;
- вартість електричної енергії, що імпортується;
- вартість електричної енергії на оптовому ринку для подальшого експорту;
- витрати на диспетчеризацію та утримання магістральних і міждержавних електромереж;
- витрати на забезпечення функціонування оптового постачальника;
- обсяг дотацій для компенсації витрат, пов'язаних з поставкою електричної енергії пільговим категоріям споживачів, затвердженому НКРЕ;
- обсяг зборів у вигляді цільової надбавки до діючого тарифу на електричну енергію;
- обсяг інвестицій на будівництво, реконструкцію і модернізацію енергетичного обладнання виробників, на фінансування розвитку нетрадиційних джерел електроенергії [4].

Відповідно до Умов та Правил здійснення підприємницької діяльності з постачання електроенергії на основі оптової ціни обласні енергопостачальні компанії розраховують роздрібні тарифи на електроенергію за класами напруги (1 клас -154-35 кВ і 2 клас-10-0,38 кВ) по формулі:

$$T_{ij} = \frac{C_o}{(1 - k_1) \cdot (1 - k_2)} + T_j^M + T_j^n, j = 1, 2, \quad (2)$$

де і-група споживачів; j-клас напруги розподільних мереж; C_o - оптова ціна продажу електроенергії на розрахований період; k_1, k_2 - економічні коефіцієнти втрат на її транспортування; T_j^M - тариф на передачу

енергії у розподільчих мережах відповідного класу напруги та T_i^p – тариф на постачання i –му споживачу [5].

Постановою НКРЕ від 22.09.2010 № 1267 ставка зонного тарифу для споживачів j -го класу напруги визначається шляхом множення роздрібного тарифу для споживачів j -го класу напруги T_j на тарифний коефіцієнт K_t відповідного періоду доби [6]:

$$T_j^t = T_j \cdot K_t, j = 1, 2; t = н, пп, п. \quad (3)$$

Величини тарифних коефіцієнтів і тривалість зонних періодів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Величини тарифних коефіцієнтів та тривалість зонних періодів.

Період часу	Тарифні коефіцієнти	Тривалість періоду, год.
Нічний	0,25	7
Полупіковий	1,02	11
Піковий	1,8	6

Отже, на сьогодні регулювання ціни на енергоринку відбувається в статистиці, виходячи із встановленої на певному інтервалі часу вартості [7], не дозволяє враховувати наявність значної частини перехідних процесів, що спричиняють значне відхилення реальної тарифної ціни від встановленої. Актуальним є створення гнучкої динамічної тарифікації, що дозволить забезпечити адекватну тарифну ціну електроенергії.

Динамічна тарифікація

Проблема розробки динамічної тарифікації постала набагато раніше. Вперше динамічні моделі тарифів були представлені у загальному теоретичному вигляді як спот-ціни, для того, аби включити питання оптимального зворотного зв'язку із промисловими споживачами і впливу масштабного впровадження таких тарифів на криву корисного навантаження. Для впровадження такої тарифікації споживачам необхідно мати здатність гнучкої і динамічної відповіді. Хоча наразі обладнання для цього легко доступне, теоретичні моделі і програмне забезпечення досі відсутні. Необхідне дослідження впливу зворотного зв'язку між постачальником та споживачами електроенергії на криву корисного навантаження. В результаті досліджень [8,9] були розроблені інтегровані моделі реагування споживачів та теорія прогнозування тарифної ціни в динамічних умовах, що створюються за допомогою динамічного ціноутворення на електроенергію. Вони представлені в якості додатків до орієнтованих інженерних моделей, які конкретизують в основному концептуальні і теоретичні роботи на тему ціноутворення в режимі реального часу, які вже з'явилися в літературі. Корисність моделей реагування споживачів було проілюстровано на прикладі промислових підприємств. Нажаль, основне допущення існуючих моделей [8,9] полягає в тому, що час старту і зупинки енергогенератора досить малий, що дає змогу прирівняти його до нуля.

Добре відомо, що, з огляду на мережу, яка може бути обмежена напругою або реальними потоками потужності, резерви також повинні просторово розташовуватися так, щоб впоратися з усіма непередбаченими обставинами. Проте, на сьогоднішній день не існує достовірного наукового методу для розташування та тарифікації таких резервів. У роботі [10] представлено новий алгоритм планування обмежень, що накладаються із міркувань безпеки мережі, які включають в себе один базовий випадок неушкодженої системи і список можливих непередбачених обставин (лінійне перевищення, втрата блоку, зростання навантаження) системи. Дотримуючись процедури мінімізації витрат, потужність і резерви виділяються просторово для комбінованих енергетичних і резервних ринків. Із застосуванням множників Лагранжа, отриманий алгоритм планування демонструє тіньові локальні ціни для резервів енергії. На відміну від інших методів, де ціноутворення зазвичай тимчасові і засновані на інженерних рішеннях і досвіді, запропонований метод, ймовірно, краще працюватиме в реструктурованих ринках, коли ринкова потужність є потенційною проблемою. Розглянутий розширений метод оптимального перетоку потужності може бути застосований для тарифікації у режимі реального часу.

У новому нерегульованому енергетичному ринку, із урахуванням стимулів, що надходять від технічних і економічних областей, доцільно розглянути розподілену генерацію (DG) в якості життєздатного варіанта рішення проблем перебоїв електричного живлення. У ході наукової роботи [11] була створена математична модель планування системи розподілу, що включає в себе три варіанти планування розширення системи. Запропоновані методи відповідають вимогам зростання навантаження за розумною ціною, а також

системним проблемам якості електроенергії. Розподілена генерація може бути використана як привабливий варіант планування, особливо в поєднанні з регулятором напруги і переривчастим навантаженням. У створеній математичній моделі цільова функція включає інвестиційні витрати, які оцінюються як загальна річна вартість плюс загальні експлуатаційні витрати, а також вартості урізаних навантажень і втрат.

Представлена у роботі [12] схема тарифікації енергогенератора у реальному часі базується на актуальних станах системи, що прогнозовані у погодинних сценаріях, та розрахованих тарифних цінах для цих станів. Даний підхід не враховує короткотривалі перехідні процеси при зміні режиму роботи енергогенератора. Також недоліком даної моделі є її лінійність, що відзначається авторами. Одним із підходів до створення динамічної тарифікації є регулювання механізмів ціноутворення на основі оптимального управління [13]. Формування тарифної ціни обов'язково повинне базуватись на динамічних моделях, що правильно включатимуть динамічний характер регулювання потужності системи і стимулювання відповідних бажаних дій. Підхід базується на лінійній квадратичній регуляції, що використовується для моделювання фізичних процесів енергогенеруючої системи, лінеаризованих у околі робочої точки. Такий метод має ряд обмежень, серед яких можна відмітити наявність мертвих зон і жорстких обмежень, наприклад, на лінійну зміну фізичних характеристик, а також наявність непередбачених обставин, що є основним джерелом помилок. У якості ще одного підходу до реалізації гнучкого формування тарифної ціни представлено стратегію централізованого управління енергогенеруючою системою у складі Microgrid, за допомогою ціноутворення в реальному часі [14]. Запропонований підхід визначає графік ціноутворення у Microgrid на добу наперед, з метою максимізації прибутку. Щоб досягти даної мети, навантаження умовно вважається гнучким і здатним миттєво змінюватися. Запропонована модель була оцінена за допомогою моделювання в різних сценаріях з різними матрицями еластичності. Отримані результати операційних витрат Microgrid і прибутку були порівняні до і після використання наведеної стратегії управління. Для подальшого розвитку моделі необхідно врахувати нелінійність базових параметрів, таких як енергія вітру і сонячна енергія. Крім того, необхідно враховувати динамічну зміну навантаження і відповідні перехідні процеси.

Інша ідея створення тарифікації у реальному часі полягає в тому, щоб визначити механізм ціноутворення на загальному рівні енергосистеми, аби спростити підтримку і вимоги до об'єднаної групи різних видів розподіленої генерації і об'єднаної групи різних видів споживачів відповідно [15]. В даному випадку споживачі прийняті у якості керованих навантажень (які можуть бути скинуті), і некерованих навантажень. Ринкова ціна є найнижчою ціною, отриманою при перетині кривої пропозиції і лінеаризованих кривих попиту (рис. 1).

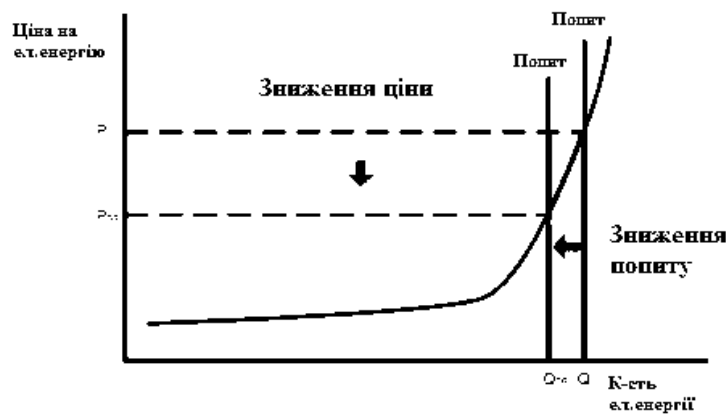


Рис. 1 Крива пропозиції та лінеаризовані криві попиту

Така ціна зазвичай задовільняє постачальників електроенергії і споживачів. Пропозиції продажу сортуються від найнижчої ціни до найвищої, тобто, у зростанні від низу до верху. Беручи до уваги, що пропозиції закупівлі влаштовані від їх найвищої ціни пропозиції до найнижчої ціни пропозиції, тобто, спадний замовлення.

Щоб визначити стратегічні результати від контролю майбутніх станів системи і тарифних цін, необхідно використовувати аналіз на основі теорії ігор. Підхід теорії ігор іноді застосовується, аби спроектувати розподілений механізм ціноутворення електроенергії в реальному часі [16]. Аби гарантувати, що постачальник / споживач не втратять прибуток, переходячи від контрактів з фіксованою тарифною ціною до тарифікації в реальному часі, може бути запропонована певна субсидія при укладанні договору. Незважаючи на це, очевидно, що постачальники і споживачі електроенергії обирають пропозиції повністю

розподіленим способом, щоб максимізувати власний прибуток. Запропоновані гарантії механізму ціноутворення при умові, що ринок сходиться за допомогою ітеративного процесу до рівноваги Неша, яка максимізує соціальне забезпечення. Крім того, щоб гарантувати безпечну роботу енергомережі, необхідно використовувати механізм ціноутворення що підвищує стабільність частотного контролю навантаження, і одночасно, підтримує рівновагу попиту-пропозиції, приймаючи до уваги обмеження рівності за допомогою подвійного методу декомпозиції.

Іноді Microgrid може змінити ціну потужності через високі вимоги в певний період. Таким чином, система з інтелектуальними пристроями для повідомлення може отримати сигнал нової тарифної ціни [17]. Очевидна необхідність застосування сенсорів, які дають змогу відслідковувати динамічну зміну параметрів генеруючої системи у реальному часі. На сьогоднішній день розвиток технології SmartGrid дає змогу використовувати розумні сенсори у енергогенеруючих системах. Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаній енергосистемі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції. У роботі [18] запропоновано схему, що базується на використанні динамічної оцінки (UDP) інтелектуальної мережі, яка дозволяє коригувати тарифну ціну відповідно до використання електроенергії в режимі реального часу. Схема UDP дозволяє використовувати об'єднану енергосистему для посилення цінних вказівок окремим споживачам згідно з їх окремим використанням електроенергії, і використанню енергії всією спільнотою споживачів в режимі реального часу. Також зберігається конфіденційність споживачів, тобто, обмежено розкриття окремого використання електроенергії відносно всієї спільноти. Представлено розширену версію eUDP, із секретними структурами, що дозволяють досягти більш високого рівня конфіденційності за рахунок додаткового обчислення.

Недоліками існуючих моделей [8,9,12,14] можна назвати використання лінеаризованих характеристик та дискретизацію у часі. У інших моделях [19] функції є лінійними та не враховують динамічну зміну генерованої потужності.

Висновки

Регулювання ціни на енергоринку наразі відбувається в статистиці, що не дозволяє здійснювати оцінку динамічної зміни тарифної ціни електроенергії у локальних ізольованих системах. Актуальним завданням є створення динамічної моделі, яка поєднує, з одного боку, енергетичні показники енергогенеруючої системи, а з іншого - економічні показники замкненої макроекономічної системи. Такого роду модель дозволить досліджувати вплив перехідних процесів генератора на зміну вартісних показників економічної системи при зміні рівня потужності, що у подальшому дасть змогу розробити гнучку динамічну тарифікацію для ізольованих систем Microgrid, що працюють у складі енергосистем розподіленої генерації.

Список використаної літератури

- 1.В.Дерзский, В. Скиба. Реформирование рынка в электроэнергетике Украины и ценообразование. - <http://www.energyexpert.com.ua>
- 2.Кириленко О.В., Білінов І.В., Парус Є.В. «Балансуючий ринок електроенергії в Україні та його математична модель» // Техн. електродинаміка. – 2011. - №2. – С. 36-43.
- 3.Постанова НКРЕ від 02.04.2001 № 309 про затвердження порядку визначення тарифів на передачу електроенергії місцевими (локальними) електромережами та тарифів на постачання електроенергії для ліцензіатів з постачання електричної енергії за регульованим тарифом.
- 4.Ірина Коссе. Прозорість та економічна обґрунтованість тарифів на електроенергію – необхідна умова реформи енергетичного сектору України// Економічні аспекти Європейської інтеграції України крізь призму виконання пріоритетів ПДА: експертний аналіз, рекомендації та публічна дискусія. 2012.
- 5.ГНД 34. 09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-154 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії, який затверджено наказом № 757 Мінпаливенерго України від 17.12.03.
- 6.Постанова НКРЕ від 22.09.2010 № 1267 щодо затвердження Тимчасового положення про порядок розрахунку економічних коефіцієнтів нормативних технологічних витрат електроенергії.
- 7.М. Shahidehpour, Н. Yamin and Z. Li, Market Operations in Electric Power System. New York: Wiley, 2002.
- 8.А.К. David, Y.C. Lee. DYNAMIC TARIFFS : THEORY OF UTILITY-CONSUMER INTERACTION // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989
- 9.Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Er& Laitinen; Jukka H&li and Erkki Antila. ELECTRICITY SPOT PRICE FORECASTING AS A PART OF ENERGY MANAGEMENT IN DE-REGULATED POWER MARKET // Energy Management and Power Delivery, 1998.
- 10.Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.
- 11.М. Siah, S. Porkar, A. Abbaspour-Tehrani-Fard, P. Poure and S. Saadate. COMPETITIVE DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING MODEL INTEGRATION OF DG, INTERRUPTIBLE LOAD AND VOLTAGE REGULATOR DEVICES // Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering 34(6):619-635 • December 2010

12. Steven Wong and J. David Fuller. Pricing Energy and Reserves Using Stochastic Optimization in an Alternative Electricity Market // IEEE Transactions on Power Systems (Volume:22 , Issue: 2) - 2007
13. Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, and Kameshwar Poolla. Consolidated Dynamic Pricing of Power System Regulation // IEEE Transactions on Power Systems (Volume:28 , Issue: 4) - 2013
14. Hadis Pourasghar Khomami, Mohammad Hossein Javidi. Energy Management of Smart Microgrid in Presence of Renewable Energy Sources Based on Real-time Pricing // Smart Grid Conference (SGC), 2014
15. Arup Sinha, Rabindranath Lahiri, Somenath Byabortta, Shyamapada Chowdhury, Sunetra Chowdhury, Peter Crussley. FORMULATION OF PRICING MECHANISM FOR MICROGRID ENERGY // SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar
16. Toru Namerikawa, Norio Okubo, Ryutaro Sato, Yoshihiro Okawa, and Masahiro Ono. Real-Time Pricing Mechanism for Electricity Market With Built-In Incentive for Participation // IEEE Transactions on Smart Grid (Volume:6 , Issue: 6) - 2015
17. Farideh Doost Mohammadi, and Ali Feliachi. Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System // 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition
18. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin and Xuemin Shen. UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid // IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 4, NO. 1, MARCH 2013
19. Inam Ullah Nutkani, Wang Peng, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg. Autonomous Economic Operation of Grid Connected DC Microgrid // 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems

I. Boiko, PhD, student, ORCID 0000-0002-8044-137X
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

RELEVANCE OF DYNAMIC TARIFFICATION APPLICATION FOR MICROGRID GENERATION SYSTEMS

The electric power industry of Ukraine is a technologically sophisticated, territorially ramified system combining power generating stations, the United Electric Power System (UES) and distribution electric networks of the country. The level of development of the electric power complex has a decisive influence on the condition of the economy in the state, on solving the problems of the social sphere and people's living standards. And it is no accident that energy independence is always associated with the national security of the state. The electric power complex of Ukraine was formed as an integral part of the electric power complex of the USSR and therefore does not fully comply with the requirements for the energy complex of an independent state. The structure of generating capacities requires a significant change. The strategic goal of the development of the electric power complex is its fundamental restructuring based on the latest technologies, ensuring maneuverability, energy and economic efficiency, environmental acceptability, external competitiveness and market operating conditions, ensuring a stable, reliable, safe, high-quality supply of electric energy to the country's economic and social sectors. Price regulation in the energy market now takes place in statics, which does not allow assessing the dynamic changes in the tariff price of electricity in local isolated systems. With a sudden change in the power of an isolated energy generating system, a change in the tariff price of electricity occurs, which cannot be taken into account when using static models. For the above example, the question arises of the need to use dynamic charging models, including the presence of transients when the generator operating modes change and their influence on the deviation of the real values of the economic parameters of the system. The dynamic impact of the electrical parameters of the generating system on the economic ones is a determining factor for rejecting the generally accepted hourly billing in Ukraine's energy networks due to its unprofitability. It is relevant to use a model of flexible dynamic pricing, which will ensure an adequate tariff price for electricity.

Key words SmartGrid, energy generating system, static billing, dynamic billing.

References

1. V. Derz's'kyi, V. Skiba. Reformuvannya rynky v elektroenerhetytsi Ukrayiny ta tsenoobrazovanye. - <http://www.energyexpert.com.ua>
2. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus YE.V. «Balansuyuchyy rynek elektroenerhiyi v Ukrayini ta yoho matematychnu model'» // Tekhn. elektrodynamika. - 2011. - №2. - S. 36-43.
3. Postanova NKRE vid 02.04.2001 r. № 309 pro pidtrymku vykorystannya taryfiv na peredachu elektroenerhetychnykh merezh (lokal'nykh korystuvachiv) elektromerezhamy ta taryfamy na rozmishchennya elektroenerhetyky dlya litsenzuvannya z rozmishchennyam elektrychnoyi enerhiyi dlya rehulyatsiyi taryfnykh taryfiv.

4.Iryna Kosse. Prohnoz ta ekonomichna obhruntovanist' taryfiv na elektroenerhetyku - neobkhidna umova reformuvannya enerhetychnoho sektoru Ukrainy // Ekonomichni aspekty Yevropeys'koyi intehratsiyi Ukrainy doviryayut' prioritytu PDA: ekspertnyy analiz, rekomendatsiyi ta publichna dyskusiya. 2012.

5.HND 34. 09.104-2003 Metodyka skladenoho balansu elektroenerhetyky v elektrychnykh vymiryuvannyakh 0,38-154 kV, yoho sklads'ki sklady ta normuvannya tekhnolohichnykh tekhnolohiy elektroenerhetyky, yaki pidtrymuyut'sya nakazom № 757 Minpalivenerho Ukrainy vid 17.12.03.

6.Postanova NKRE vid 22.09.2010 № 1267 rozkryto Tymchasove vykonannya pro porядok vykorystannya ekonomichnykh faktoriv, yaki diyut' inshi elektroenerhetyky.

7.M. Shahidehpour, H. Yamin and Z. Li, Market Operations in Electric Power System. New York: Wiley, 2002.

8.A.K. David, Y.C. Lee. DYNAMIC TARIFFS : THEORY OF UTILITY-CONSUMER INTERACTION // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989

9.Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Erkki Laitinen; Jukka Heli and Erkki Antila. ELECTRICITY SPOT PRICE FORECASTING AS A PART OF ENERGY MANAGEMENT IN DEREGULATED POWER MARKET // Energy Management and Power Delivery, 1998.

10.Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.

11.M. Siah, S. Porkar, A. Abbaspour-Tehrani-Fard, P. Poure and S. Saadate. COMPETITIVE DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING MODEL INTEGRATION OF DG, INTERRUPTIBLE LOAD AND VOLTAGE REGULATOR DEVICES // Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering 34(6):619-635 • December 2010

12.Steven Wong and J. David Fuller. Pricing Energy and Reserves Using Stochastic Optimization in an Alternative Electricity Market // IEEE Transactions on Power Systems (Volume:22 , Issue: 2) - 2007

13.Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, and Kameshwar Poolla. Consolidated Dynamic Pricing of Power System Regulation // IEEE Transactions on Power Systems (Volume:28 , Issue: 4) - 2013

14.Hadis Pourasghar Khomami, Mohammad Hossein Javidi. Energy Management of Smart Microgrid in Presence of Renewable Energy Sources Based on Real-time Pricing // Smart Grid Conference (SGC), 2014

15.Arup Sinha, Rabindranath Lahiri, Somenath Byaborta, Shyamapada Chowdhury, Sunetra Chowdhury, Peter Crussley. FORMULATION OF PRICING MECHANISM FOR MICROGRID ENERGY // SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar

16.Toru Namerikawa, Norio Okubo, Ryutaro Sato, Yoshihiro Okawa, and Masahiro Ono. Real-Time Pricing Mechanism for Electricity Market With Built-In Incentive for Participation // IEEE Transactions on Smart Grid (Volume:6 , Issue: 6) - 2015

17.Farideh Doost Mohammadi, and Ali Feliachi. Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System // 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition

18.Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin and Xuemin Shen. UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid // IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 4, NO. 1, MARCH 2013

19.Inam Ullah Nutkani, Wang Peng, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg. Autonomous Economic Operation of Grid Connected DC Microgrid // 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems

Надійшла 21.11.2019

Received 21.11.2019

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.165.62

О. Ю. Черноусенко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1427-8068

В. А. Пешко, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0003-0610-1403

Б. О. Марисюк, магістрант ORCID 0000-0003-1099-0290

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНО-СКЛАДНОГО ОБЕРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Основне обладнання більшості вітчизняних енергоблоків, що експлуатуються на теплових та атомних електричних станціях, вичерпало свій проектний ресурс. З огляду на недостатнє фінансування енергетичної галузі забезпечити технічне переозброєння старого обладнання новим у найближчій перспективі складно. Доцільним є забезпечення високих залишкових напрацювань поточного обладнання, на базі дослідження індивідуальних ресурсних показників конкретного устаткування. Задача оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання вирішується з застосуванням методів комп'ютерного моделювання окремих режимів експлуатації. Зрозумілим є те, що врахування усіх особливостей натурної геометричної моделі в математичному аналізі призведе до значного зростання затрачених людських зусиль та ресурсів комп'ютерно-обчислювальної техніки. Тому метою даної дослідницької роботи є раціоналізація математичної моделі ротора циліндру середнього тиску парової турбоустановки К-200-130. Запропоновано та досліджено два варіанти заміни робочих лопаток та бандажних кріплень. Верифікація моделей проведена на основі порівняння розрахованих критичних та власних частот роторів з даними, що наводяться заводами виготовлювачами даного теплоенергетичного обладнання. Успішну верифікацію пройшла запропонована модель ротора з заміною робочих лопаток тороїдальними кільцями еквівалентної довжини та маси, при цьому похибка обчислень не перевищує 5,5 %. Тому запропонований в даній роботі метод раціоналізації можна використовувати для скорочення затрачених ресурсів при комп'ютерному моделюванні складного обертового обладнання.

Ключові слова: математичне моделювання, парова турбіна, ротор, критична швидкість, власна частота, К-200-130

Вступ

Більшість вітчизняних енергоблоків потужністю 200-800 МВт вичерпали свій парковий ресурс, що складає 200-220 тис. год [1]. За останній роки не було замінено жодної парової турбоустановки, а зважаючи на прогнозовані темпи розвитку економіки України завдання подовження ресурсу потужного енергетичного обладнання набуває все актуальнішого значення.

Однією з дуже актуальних проблем сучасної енергетики України є подовження ресурсу високотемпературних роторів парових турбін. Так як ротори високого (РВТ) та середнього тиску (РСТ) експлуатуються в умовах високих температур, то в них накопичуються пошкодження, причиною яких є малоциклова втома та повзучість металу, а також зміна фізико-механічних властивостей та структури сталі. Сукупність цих факторів призводить до появи залишкових деформацій (прогинів) та утворення тріщин критичних розмірів.

В процесі експлуатації енергетичного обладнання, в їх деталях з'являються напруження, які постійно змінюються в часі за інтенсивністю та напрямком. Як відомо, при тривалій дії цих змінних напружень, металу деталі властиво накопичувати пошкодження. Постійно накопичуючись, дані пошкодження призводять до зародження та розвитку тріщин, які в кінцевому результаті призведуть до руйнування деталі [2].

При пусках паротурбінної установки відбувається нерівномірний прогрів металу, внаслідок чого
© О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко, Б. О. Марисюк, 2019

виникають термічні напруження.

Даний процес призводить до зародження та розвитку тріщин за механізмом малоциклової втоми [1].

Світовий досвід експлуатації енергетичного обладнання показує, що випадки крихкого руйнування елементів турбоустановок внаслідок розвитку тріщин трапляються дуже рідко. Однак, якщо це трапляється, то наслідки аварії є катастрофічними. Трагічним прикладом такого процесу є руйнування валопроводу парової турбіни К-300-240 ЛМЗ на Каширській ТЕС, внаслідок чого була повністю зруйнована машинна зала енергоблоку потужністю 300 МВт. [3].

На даний момент, турбоагрегати К-200-130 беруть активну участь у регулюванні денних піків та нічних провалів електричного навантаження, хоча, згідно з інструкцією по експлуатації, призначені для роботи в базовій, або напівбазовій частині графіка електричних навантажень [4].

Досвід світових аварійних ситуацій на електричних станціях показує, що найчастіше до поломок обладнання призводить накопичення пошкоджень в металі рухомих конструкційних елементів від втоми. Літературні джерела зазначають, що найбільш частою причиною виходу з ладу теплоенергетичного обладнання є пульсуючі високотемпературні потоки пару в робочих циліндрах парової турбоустановки, поперечні та крутні коливання валопроводів в ході їх довготривалої експлуатації [5, 6]. Тому розробка нових розрахунково-експериментальних методів визначення втомного пошкодження роторів турбоагрегатів в умовах динамічних крутних моментів становить значний практичний та науковий інтерес.

Мета і завдання дослідження

Дана робота присвячена раціоналізації підходів до моделювання геометрично-складного обертового обладнання електричних станцій з метою зменшення розрахункового часу проведення числових досліджень вібраційного та коливального стану та зі збереженням достатньої точності обрахунку.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- створення просторового аналогу ротора середнього тиску турбіни К-200-130 в кількох постановках: з заміною робочих лопаток та бандажних кріплень ступенів тиску на еквівалентні розподілені маси прикладені до кореневого діаметру ступенів, та з заміною робочих лопаток і бандажів на тороїдальні диски еквівалентної довжини та маси;
- проведення числових досліджень власних та критичних частот обертання для обох моделей ротору середнього тиску та побудова відповідних діаграм Кемпбелла;
- виконання порівняльної оцінки отриманих значень критичних частот обертання ротора середнього тиску з аналогічними даними вказаними заводом-виготовлювачем турбіни.

Матеріал і результати дослідження

Валопровід парової турбіни К-200-130 представляється сукупністю роторів високого, середнього, низького тиску та ротору генератора. З точки зору проведення математичних розрахунків методом кінцевих елементів, модель такого енергетичного устаткування є складною для виконання числових досліджень. Це пов'язано, як з габаритними розмірами об'єкту дослідження, так і з його геометричною формою. Наявність ступенів тиску, що представляються дисками, робочими лопатками та бандажними кріпленнями, а також ступенів кінцевих та діафрагмових ущільнень призводять до необхідності розбиття моделі на більшу кількість кінцевих елементів, та, як наслідок, провокують збільшення розрахункового часу для вирішення математичних рівнянь в кожному елементі.

Розповсюдженою практикою при вирішенні таких задач є спрощення геометричної моделі. Проте в задачах дослідження вібраційного та коливального станів обертового устаткування таке спрощення може привести до зменшення точності обрахунку та отримання результатів, що не є адекватними. Таким чином, для проведення майбутніх числових досліджень валопроводу парової турбіни К-200-130, на першому етапі виконано оцінку власних та критичних частот обертання ротора середнього тиску цієї ж турбіни із застосуванням двох різних геометричних моделей.

Для верифікації створених моделей виконано порівняння критичної частоти обертання, що отримується при розрахунках в програмному комплексі Ansys з даними, що приводяться в «Інструкції з будови, обслуговування, пуску та зупинки турбіни К-200-130-1 заводу ЛМЗ» [4].

Перша модель ротора середнього тиску представлена відтворенням основної конфігурації валу та його 11 ступенів тиску. Геометрія кінцевих та діафрагмових ущільнень спрощена до форми гладкої циліндричної поверхні, з радіусом, що відповідає середньому значенню кожного ступеня ущільнення. Лопатки та бандажні кріплення вирішено замінити еквівалентними розподіленими масами, що прикладені до кореневого діаметру відповідного ступеню.

Кінцево-елементне розбиття виконано з застосуванням тетраедричних тіл. Побудована сітка розбиває модель на 84887 кінцевих елементи. В програмному комплексі Ansys задано два типи кріплення. Ліва частина ротора закріплена як опорно-упорний підшипник, а права – опорний.

Досліджуваний діапазон швидкості обертання ротора складає від 0 об/хв до 3360 об/хв. Верхня межа даного діапазону відповідає 112 % від номінальної частоти обертання ротора. Це є максимально можлива

частота обертання турбіни, після перевищення якої спрацює автоматичний захист турбіни від розгону та вона примусово зупиняється.

Для знаходження критичних та власних частот обертання ротора в даному інтервалі побудовано діаграму Кемпбелла, що представлена на рис. 2. Додатково, результати розрахунку наведено в таблиці 1. Час обчислення даної задачі – 24 хв.

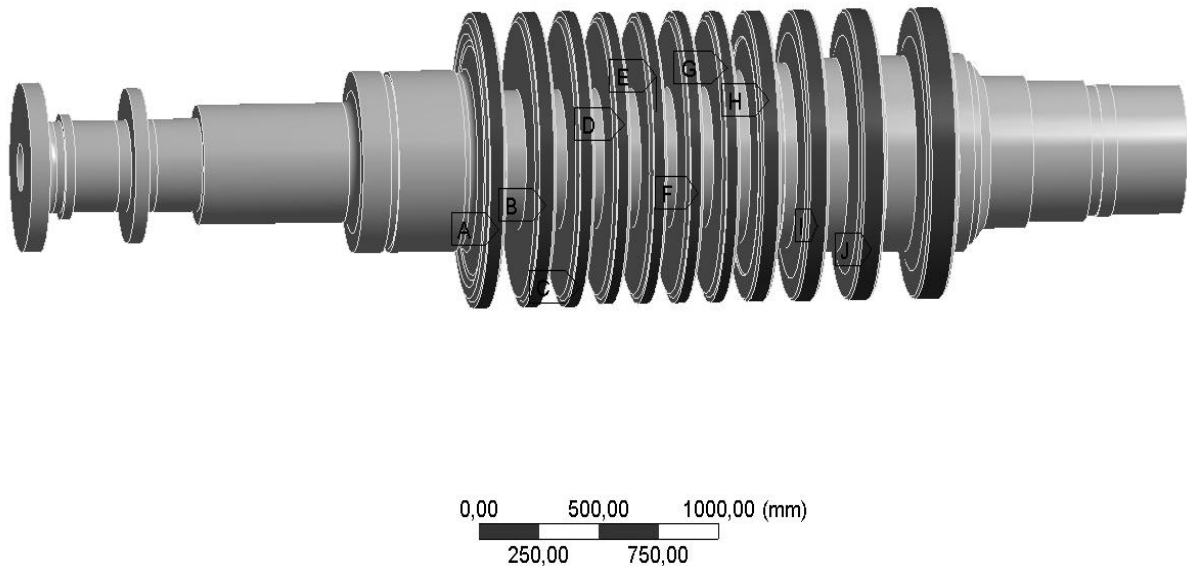


Рис. 1 – Геометрична модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з еквівалентними розподіленими масами

На отриманій діаграмі Кемпбелла для першої моделі, на осі абсцис відкладена швидкість обертання ротора (n , об/хв), а по осі ординат частоти власних коливань моделі (ν , Гц). Точки перетину ліній власних частот коливання (мода 1-5) з лінією частоти обертання ротору ($R=1$) показують критичну частоту обертання при якій, внаслідок співпадіння частот, виникає, так зване, явище резонансу. Дане явище становить особливу небезпеку для обертових агрегатів. Як видно з діаграми, для даної моделі внаслідок програмного розрахунку не вдалося знайти критичну швидкість обертання в заданому інтервалі частот, що свідчить про її недостатню адекватність.

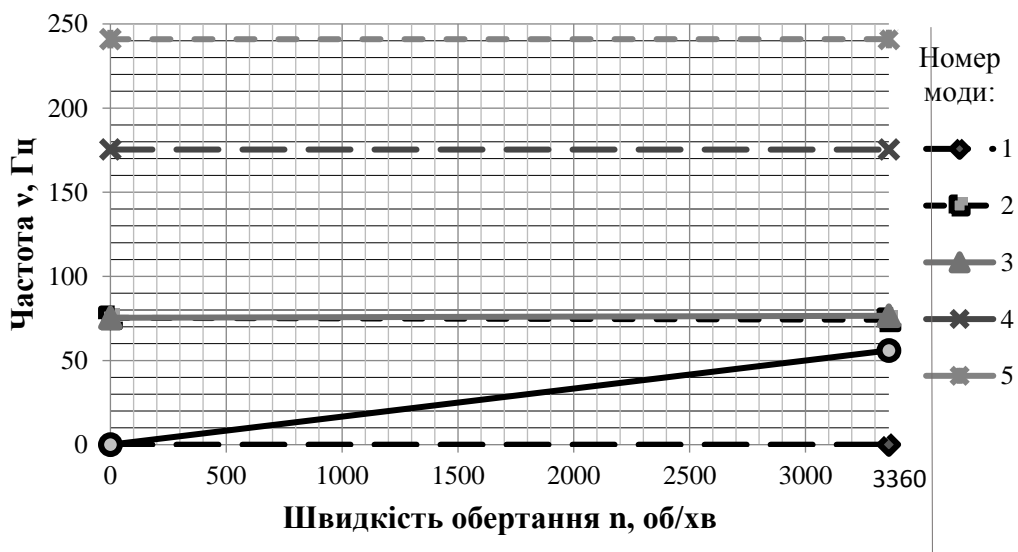


Рис. 2 – Діаграма Кемпбелла для моделі ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з еквівалентними розподіленими масами робочих лопаток та бандажних кріплень

Очевидним недоліком першої моделі є те, що вплив ступенів тиску на вібраційний стан ротора був порушений через невідповідність геометрії ступенів моделі та натурального об'єкту. Хоч маса робочих лопаток та бандажних кріплень і була врахована у вигляді розподілених мас, що задавались як граничні умови першої моделі, проте область їх прикладання – кореневий діаметр ступенів, не зовсім точно відповідає дійсності.

Периферійний діаметр робочих лопаток ротора середнього тиску перевищує кореневий діаметр в 1,1-1,7 разів. Таким чином на першій моделі неможливо достовірно задати області прикладання еквівалентних розподілених мас робочих лопаток та бандажів.

Таблиця 1 – Критична швидкість та власна частота обертання першої моделі

Мода, №	Критична швидкість, об/хв	0, об/хв	3360, об/хв
1	0	$7,3 \cdot 10^{-5}$ Hz	$7,3 \cdot 10^{-5}$ Hz
2	0	75,38 Hz	74,22 Hz
3	0	75,4 Hz	76,58 Hz
4	0	175,37 Hz	175,34 Hz
5	0	240,92 Hz	240,96 Hz

Для другої моделі вирішено замінити лопатки та бандажні кріплення на тороїдальні кільця. Діаметри кілець відповідають довжині робочих лопаток на певних ступенях. При цьому маси тороїдальних кілець дорівнюють сумарній масі робочих лопаток та бандажних кріплень на відповідних робочих ступенях. Така модель, здатна більш достовірно описати динамічну поведінку ротора середнього тиску турбоустановки К-200-130. Зображення даної геометричної моделі показано на рис. 3.

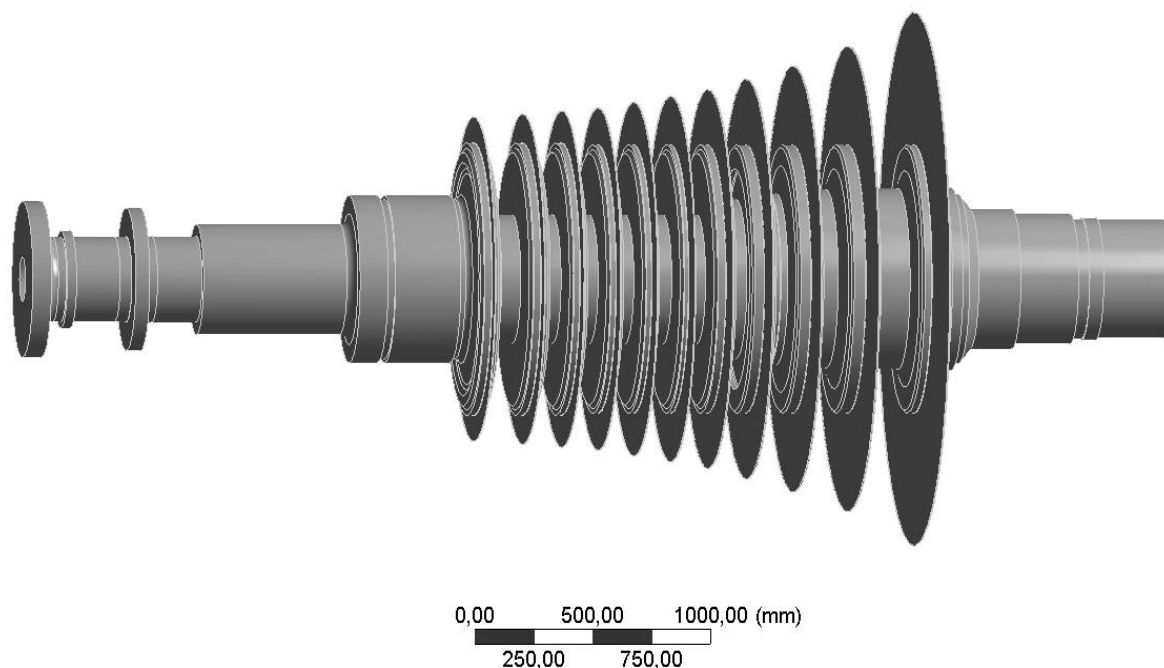


Рис. 3 – Геометрична модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з тороїдальними кільцями еквівалентної довжини та маси

Кінцево-елементне розбиття розрахункової області другої моделі виконано за аналогічними алгоритмами, що застосовані для першої моделі. При цьому через відносно малу товщину тороїдальних кілець довелося в декілька разів зменшити розмір їхніх кінцевих елементів. Кількість кінцевих елементів складає 108980, при цьому час розрахунку збільшився майже вдвічі та становить – 41 хв. Побудована

діаграма Кемпбелла обертового стану другої моделі ротора середнього тиску показана на рис. 4. Результати програмного розрахунку наведено в таблиці 2.

Провівши порівняльну оцінку отриманих критичних швидкостей з даними, що наведені в [4], можна постановити, що похибка розрахунку становить 5,5 %. Враховуючи малість похибки можна вважати, що дана модель пройшла верифікацію та придатна для подальшого програмного моделювання.

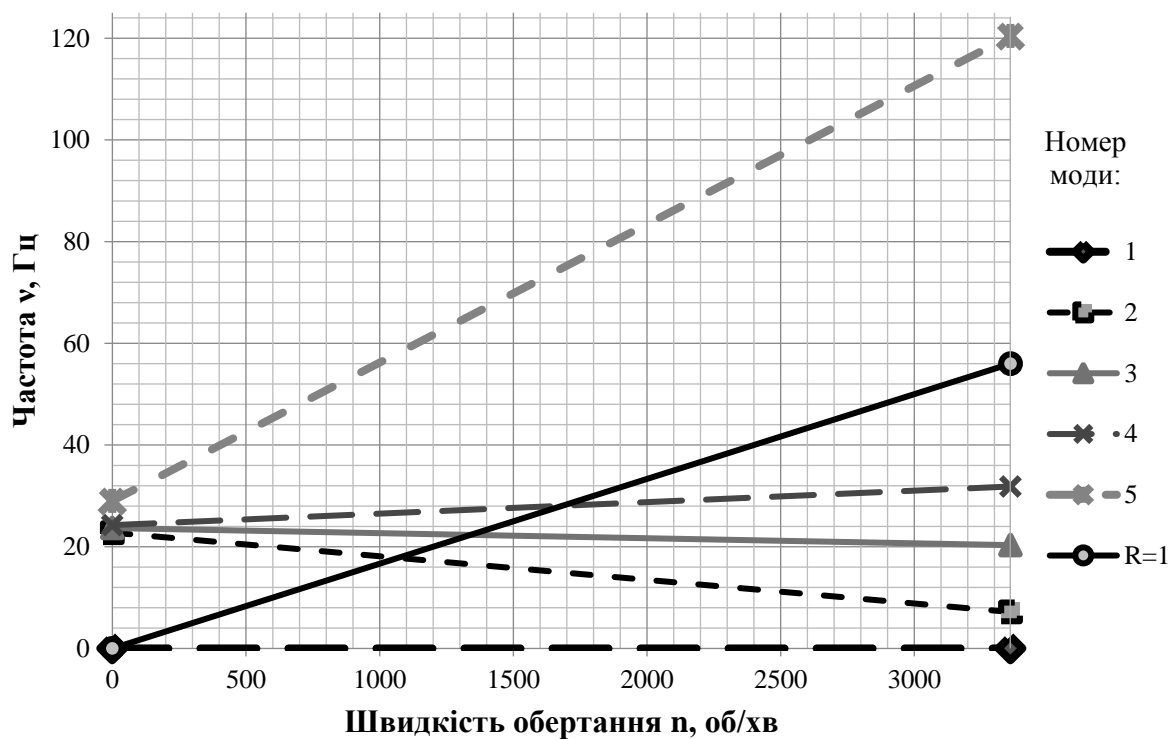


Рис. 4 – Діаграма Кемпбелла для моделі ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з тороїдальними кільцями еквівалентної довжини та маси

Аналізуючи отримані дані стає очевидним, що вплив робочих лопаток на критичну частоту є досить значним. Розподілені маси не можуть в повній мірі відтворити вплив лопаток та бандажних кріплень на динамічну поведінку моделі.

Таблиця 2 – Критична швидкість та власна частота обертання другої моделі

Мода №	Критична швидкість, об/хв	0, об/хв	3360, об/хв
1	0	$3,5 \cdot 10^{-4}$ Hz	$3,5 \cdot 10^{-4}$ Hz
2	1068,6	22,77 Hz	7,17 Hz
3	1339,7	23,67 Hz	20,32 Hz
4	1683,0	24,25 Hz	31,84 Hz
5	0	29,01 Hz	120,43 Hz

Відсутність тороїдальних кілець призводить до суттєвого зростання власних частот ротора. Як приклад, можна порівняти другу моду. В першій моделі вона становить 75,38 Hz, що в 3,3 рази більше ніж у другій.

Висновок

1. В роботі проведено розрахункову оцінку критичних частот ротора середнього тиску турбіни К-200-130 для двох геометричних моделей: з заміною робочих лопаток та бандажних кріплень ступенів тиску на

еквівалентні розподілені маси прикладені до кореневого діаметру ступенів, та з заміною робочих лопаток і бандажів на тороїдальні диски еквівалентної довжини та маси.

2. Успішну верифікацію пройшла тільки модель з тороїдальними кільцями. Відхилення отриманих розрахункових даних від аналогічних, що наведені заводом-виготовлювачем становлять 5,5%.

3. Заміна робочих лопаток розподіленими масами не забезпечує відтворення в повній мірі динамічної поведінки ротора парової турбіни.

4. При проведенні числових досліджень вібраційного та коливального станів геометрично-складного обертового обладнання електростанцій можна рекомендувати заміну робочих лопаток та бандажних кріплень ідентичними по масі та довжині тороїдальними кільцями з метою раціоналізації розрахункової моделі.

Список використаної літератури

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція [На заміну ГКД 34.17.401-95; чинний від 2005-04-21]. Вид. офіц. Київ : ОЕП "ГРІФРЕ", 2004. 76 с.

2. Chernousenko O. Development of a technological approach to the control of turbine casings resource for supercritical steam parameters / O. Chernousenko, D. Rindyuk, V. Peshko, V. Goryazhenko // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2018 – Volume 2, Issue 1(92) – pp. 51-56.

3. Загретдинов И.Ш. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы. / Загретдинов И.Ш., Костюк А.Г., Трухний А.Д., Должанский П.Р // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 5-15.

4. Инструкция по устройству, обслуживанию, пуску и останову турбины К-200-130-1 завода ЛМЗ / Типовая инструкция по эксплуатации. – ООО «ДТЭК Луганская ТЭС». – г. Счастье. – 2006. – 86 с.

5. Peshko V. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines / V. Peshko, O. Chernousenko, T. Nikulenkova, A. Nikulenkov // Propulsion and Power Research – China : National Laboratory for Aeronautics and Astronautics, 2016 – Volume 5, Issue 4 – pp. 302-309.

6. Комаров В.А. Состояние и повреждаемость турбоагрегатов. / В.А. Комаров // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностирования оборудования электрических станций: сб. докл. – Москва. – 2007. – С. 150-154.

УДК 621.165.62

О. Ю. Черноусенко, д-р. техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-1427-8068**

В. А. Пешко, канд. техн. наук, ст. преп., **ORCID 0000-0003-0610-1403**

Б. О. Марисюк, магистрант **ORCID 0000-0003-1099-0290**

**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ-СЛОЖНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Основное оборудование большинства отечественных энергоблоков, которые эксплуатируются на тепловых и атомных электрических станциях, исчерпало свой проектный ресурс. Учитывая недостаточное финансирование энергетической отрасли обеспечить техническое перевооружение старого оборудования новым в ближайшей перспективе сложно. Целесообразным является обеспечение высоких остаточных наработок текущего оборудования, на базе исследования индивидуальных ресурсных показателей конкретного оборудования. Задача оценки остаточного ресурса энергетического оборудования решается с применением методов компьютерного моделирования отдельных режимов эксплуатации. Ясно то, что учет всех особенностей натурной геометрической модели в математическом анализе приведет к значительному росту затраченных человеческих усилий и ресурсов компьютерно-вычислительной техники. Поэтому целью данной исследовательской работы является рационализация математической модели ротора цилиндра среднего давления паровой турбоустановки К-200-130. Предложены и исследованы два варианта замены рабочих лопаток и бандажных креплений. Верификация моделей проведена на основе сравнения рассчитанных критических и собственных частот роторов данным, которые приводятся заводами изготовителями данного теплоэнергетического оборудования.

Успешную верификацию прошла предложенная модель ротора с заменой рабочих лопаток тороидальными кольцами эквивалентной длины и массы, при этом погрешность вычислений не превышает 5,5%. Поэтому предложенный в данной работе метод рационализации можно использовать для сокращения затраченных ресурсов при компьютерном моделировании сложного вращающегося оборудования.

Ключевые слова: математическое моделирование, паровая турбина, ротор, критическая скорость, собственная частота, K-200-130

O. Chernousenko, Doct. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-1427-8068

V. Peshko, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Prof., **ORCID** 0000-0003-0610-1403

B. Marysiuk, Msc., **ORCID** 0000-0003-1099-0290

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

RATIONALIZATION OF THE APPROACHES OF NUMERICAL SIMULATION OF THE GEOMETRICALLY COMPLEX ROTATING EQUIPMENT OF ELECTRICAL STATIONS

The basic equipment of the most domestic power units is operated at thermal and nuclear power plants and has exhausted its design resource. Given the lack of funding for the energy sector, it is difficult to re-equip old equipment with new equipment in the near term. It is advisable to ensure a high residual experience of current equipment, based on the study of individual resource performance of specific equipment. The task of estimating the residual resource of power equipment is solved using the methods of computer simulation of separate operating modes. It is clear that taking into account all the features of a full-scale geometric model in mathematical analysis will lead to a significant increase in the human effort and resources of computer and computer engineering. Therefore, the purpose of this research is to rationalize the mathematical model of the rotor cylinder medium pressure steam turbine K-200-130. Two variants of replacement of working blades and bandage fasteners are proposed and investigated. The models are verified on the basis of a comparison of the calculated critical and natural frequencies of the rotors with the data provided by the manufacturers of the given thermal power equipment. The proposed model of rotor with replacement of the working blades with toroidal rings of equivalent length and mass has been successfully verified, and the error of calculation does not exceed 5.5%. Therefore, the rationalization method proposed in this paper can be used to reduce wasted resources in computer modeling of complex rotating equipment.

Key words: math modeling, steam turbine, rotor, critical speed, natural frequency, K-200-130

Bibliography

1. GRIFRE OEP, SOU-H MPE 40.1.17.401:2004. Control of metal and prolongation of basic elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Typical instruction
2. O. Chernousenko, D. Rindyuk, V. Peshko, V. Goryazhenko, "Development of a technological approach to the control of turbine casings resource for supercritical steam parameters", EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, vol. 2, no. 1(92) pp. 51-56, 2018.
3. I. Zagretidinov, A. Kostyuk, A. Truhniy, P. Dolzhansky, "The destruction of the 300 MW turbine unit of the Kashira TPP: causes, consequences and conclusions", Heat power engineering, no. 5, pp. 5-15, 2004
4. LLC "DTEK Lugansk TPP", "Instructions for the design, maintenance, start-up and shutdown of the C-200-130-1 turbine of the LMZ plant / Typical operating instructions", Schast'ye, 2006.
5. V. Peshko, O. Chernousenko, T. Nikulenkova, A. Nikulenkov "Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines", Propulsion and Power Research, China : National Laboratory for Aeronautics and Astronautics, vol 5, no 4, pp. 302-309, 2016.
6. V. Komarov, "Condition and damage of turbine units", Problems of vibration, vibration adjustment, vibration monitoring and diagnostics of power plant equipment, Moscow, Col. Rep., pp. 150-154, 2007.

Надійшла 19.10.2019

Received 19.10.2019

В.А. Попов, д-р. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-3484-4597
Е.С. Ярмолюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-8571-2573
Н.Н. Федосенко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-7077-8334
В.В. Ткаченко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4528-7661
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПО СОВОКУПНОСТИ РЕЖИМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены вопросы оценки влияния распределенной генерации на такие режимные характеристики распределительной сети как потери электрической энергии и напряжения, надежность электроснабжения. Данные факторы целесообразно учитывать при сравнении различных вариантов интеграции генерирующих источников в электрическую сеть. Показано, что в распределительных сетях оценка указанных характеристик режима невозможна без учета неопределенности информации и предложены пути решения данной задачи. Разработаны методы адекватного учета фактического уровня неопределенности информации при определении значений электрических нагрузок и выходной мощности альтернативных источников распределенной генерации, моделировании режимов распределительных сетей и оценке их основных показателей. Представлен алгоритм многокритериального сравнения альтернатив с учетом неопределенности учитываемых критериев, их различной физической природы и размерности. Реализация полученных в работе результатов позволит повысить интегральную эффективность работы современных распределительных сетей с подключенными к ним источниками распределенной генерации.

Ключевые слова: неопределенность информации, распределенная генерация, многокритериальное сравнение альтернатив.

Сегодня применение распределенной генерации (РГ) рассматривается в качестве одного из актуальных направлений развития мировой электроэнергетики. Однако при решении вопросов внедрения генерирующих источников часто практический интерес представляет сравнение различных вариантов их применения, в частности, с точки зрения влияния на основные показатели режима электрических сетей, характеризующих, например, уровень потерь электрической энергии, надежность электроснабжения, отклонения напряжения. Это позволяет не только оценить характер и степень данного влияния, но при необходимости выбрать из ряда альтернативных вариантов наиболее рациональные в этом отношении решения относительно применения РГ. Вместе с тем, учитывая, что указанные генерирующие источники чаще всего интегрируются в сети низкого или среднего напряжения, при рассмотрении указанной задачи необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Во-первых, крайне ограниченный объем измерительных устройств, которые имеются в настоящее время в отечественных распределительных сетях (РС), не позволяют адекватно моделировать их режимы без учета неопределенности информации. Проблема дефицита необходимого информационного обеспечения еще в большей степени проявляется при интеграции в данные сети источников РГ, в первую очередь, альтернативного характера, выходная мощность которых в значительной степени зависит от ряда труднопрогнозируемых факторов в основном метеорологического характера.

Во-вторых, указанные выше показатели режима имеют различную физическую природу и не могут быть объективно представлены единой интегральной характеристикой, например, экономического характера, что предполагает необходимость использования для решения данной задачи методы многокритериального сравнения альтернатив.

В-третьих, предлагаемые для указанной цели методы принятия решений должны иметь возможность оперировать с нечетко заданными критериями различной природы и размерности.

Таким образом, целью представленных исследований является разработка методов адекватного учета фактического уровня неопределенности информации при определении значений электрических нагрузок и выходной мощности альтернативных источников РГ, моделировании режимов РС и оценке их основных показателей, а также адаптации процедуры многокритериального принятия решений к условиям, когда отдельные критерии представлены нечеткими количественными или качественными величинами.

© В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, Н.Н. Федосенко, В.В. Ткаченко, 2019

В работах, например, [1, 2] был предложен ряд методик и алгоритмов, которые позволяют сформировать нечеткие оценки нагрузок и выходной мощности генерирующих источников с учетом фактического уровня неопределенности используемой для данной цели информации, основная суть которых заключается в следующем.

Оценки электрической нагрузки отдельных потребителей или узлов сети формируются на основании типовых графиков (ординаты которых, учитывая ограниченные статистические данные, используемые для их формирования, и с целью повышения адекватности представляются интервальными величинами [3]) и некоторого количества ретроспективных измерений нагрузок и/или их косвенных значений, полученных, например, путем пересчета данных о месячном электропотреблении [3]. В этом случае, результат каждого прямого или косвенного измерения нагрузки (P_{kt}), трансформируется в интервальные оценки отдельных ординат соответствующего графика нагрузки вида $[\underline{P}_{kt}, \overline{P}_{kt}]$, $[\underline{P}_t^*, \overline{P}_t^*]$ – интервальные оценки ординат соответствующего типового графика нагрузки, $k \in K$, $t = 1, \dots, T$, (рис. 1), где K – объем используемых данных, \underline{P}_{kt} , \overline{P}_{kt} – соответственно нижняя и верхняя границы интервальной оценки t -ой ординаты графика нагрузки. Последующий механизм формирования нечетких (обобщенных) оценок нагрузок представлен на рис. 1 и, как показывает практика расчетов, наиболее удобной формой их представления является задание в виде нечетких множеств, в частности, L - R типа с трапециевидальными функциями принадлежности [3].

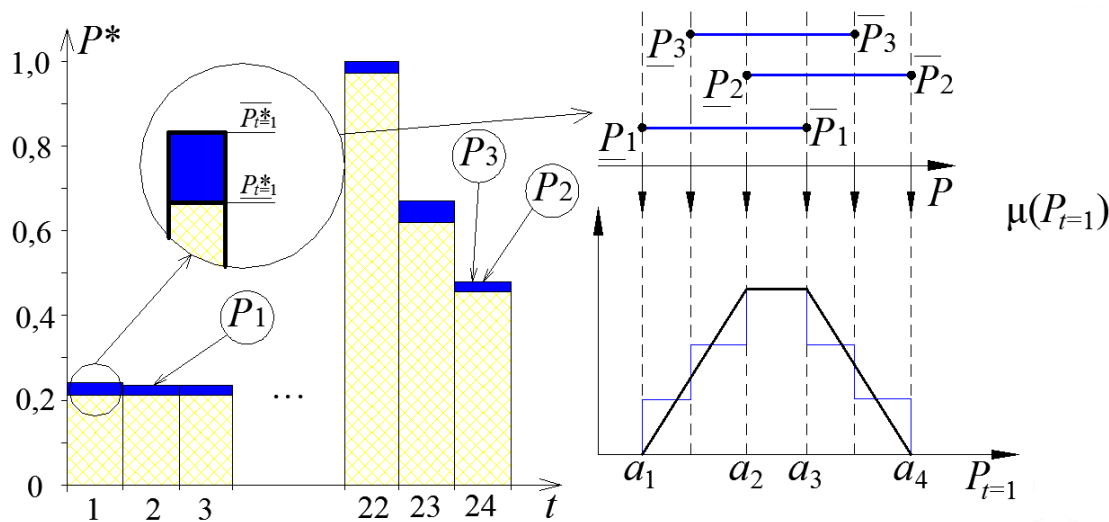


Рисунок 1 – Интервальный типовой график и нечеткая оценка нагрузки

Различные физические процессы, лежащие в основе работы отдельных источников РГ, и геофизические факторы, которые влияют на их функционирование, не позволяют сформировать унифицированный подход для расчета выходных характеристик с учетом фактического уровня неопределенности имеющейся информации. В связи с этим были разработаны методики, например, [1], которые дают возможность наиболее рационально задействовать все имеющиеся соответствующие данные о технических характеристиках, конкретных условиях эксплуатации, физических процессах, лежащих в основе их работы, и ряде гидрометеорологических факторов для оценки выходной мощности различных альтернативных источников энергии в отдельные периоды времени. В частности, выходная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) для произвольного момента времени может быть определена следующим образом [1, 4]

$$\tilde{P}_{ВЭС_t} = \rho \frac{F}{2} [\underline{V}_t^3, \overline{V}_t^3] \tilde{\xi} \tilde{\eta}_p \tilde{\eta}_g \tilde{\eta}_{ппр}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; F – площадь, ометаемая ветроколесом; $\underline{V}_t, \overline{V}_t$ – интервальная оценка скорости ветра на высоте установки ветроколеса; $\tilde{\xi}$ – коэффициент использования скорости ветра; $\eta_p, \eta_g, \eta_{ппр}$ – к.п.д. соответственно повышающего редуктора, ветрогенератора, преобразовательного устройства (выпрямительно-инверторного блока).

В данном случае скорость ветра задается интервальной величиной, определяемой на основе построенного по ограниченному статистическим данным соответствующего типового (для предполагаемого

места установки ВЭС и сезона года) графика [1, 4]. Остальные, входящие в (1), неопределенные параметры представляются нечеткими числами с треугольными функциями принадлежности. Это объясняется тем, что на предварительных этапах проектирования не всегда имеется информация о конкретных технических характеристиках оборудования и они определяются на основании справочных данных, задаваемых чаще всего в виде диапазона их возможных значений. В этом случае при стандартном подходе, ориентированном на детерминированную информацию, в расчетах использовались, как правило, значения параметров, соответствующие серединам приведенных интервалов. Учет всего возможного диапазона изменений соответствующего показателя (например, задавая его нечетким числом с треугольной функцией принадлежности) призван повысить адекватность моделируемых характеристик.

Таким образом, учитывая характер и форму задания начальных данных, а также правила выполнения операций с нечеткими числами [1, 5], оценка выходной мощности источника РГ (в данном случае ВЭС) для любого времени суток t характерного сезона года будет описываться нечетким множеством (нечетким числом) с трапецидальной функцией принадлежности.

Следовательно, определение выходной мощности альтернативных источников РГ и электрических нагрузок осуществляется в рамках единой методологии, что позволит эффективно использовать полученные результаты при определении потокораспределения и последующей оценке параметров режимов систем электроснабжения с учетом реальной неопределенности информации.

В то же время сформированные таким образом нечеткие оценки нагрузок и выходной мощности источников РГ отражают параметры режима в среднем за некоторый характерный период времени и в подобном виде они могут быть непосредственно использованы для определения такой характеристики работы системы электроснабжения, отражающей ее надежность, как, например, ожидаемая величина

недоотпущенной электроэнергии ($EENS$):
$$EENS = \omega \tau \sum_{i=1}^n \tilde{P}_{срi}$$
 (где ω – удельная повреждаемость

элементов сети; τ – среднее время восстановления электроснабжения; $P_{срi}$ – средняя нагрузка i -го элемента

сети). Очевидно, что в этом случае по аналогии с нечеткой оценкой средней нагрузки величина $EENS$ (не зависимо от того будут ли значения ω и τ заданы детерминированными, интервальными или нечеткими числами) также представляется нечетким числом с трапецидальной функцией принадлежности.

Вместе с тем при расчете таких показателей режима как потери электрической энергии или напряжений с целью снижения уровня неопределенности получаемых оценок целесообразно по возможности учесть пусть и ограниченные, но все же имеющиеся в сети оперативные измерения.

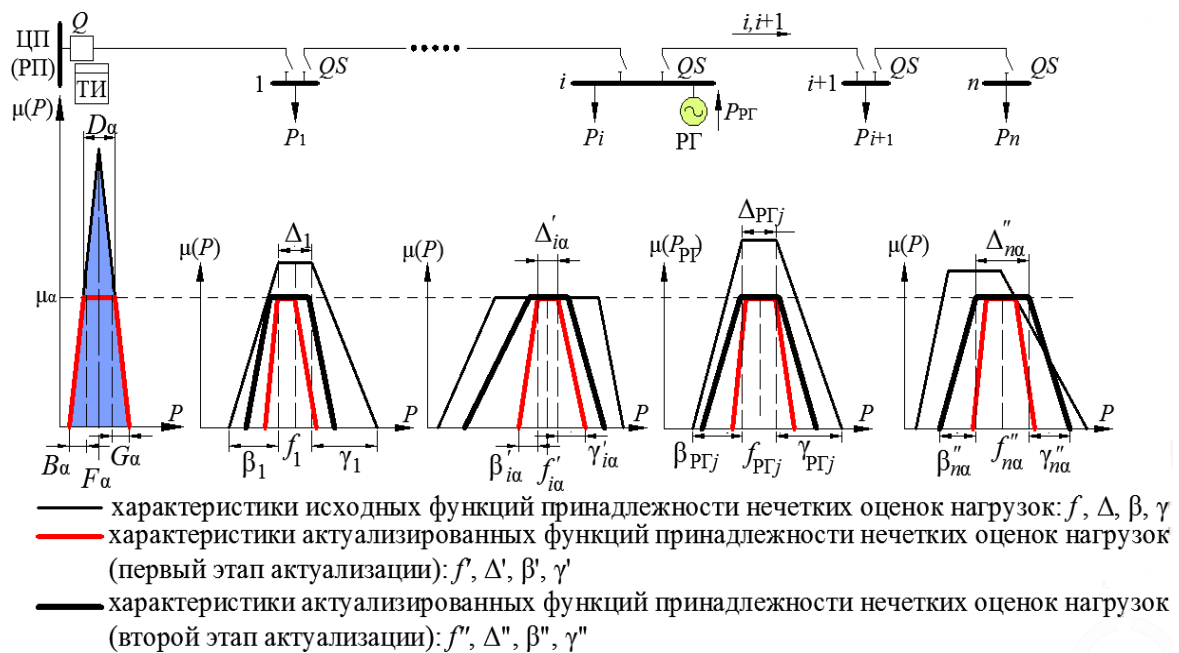


Рисунок 2 – Процедура актуализации нечетких оценок нагрузок узлов и выходных мощностей источников РГ

Предложенный для данной цели эвристический метод [3] позволяет исключить использование арифметических операций над нечеткими множествами, которые приводят к возрастанию уровня неопределенности, а оперирует с характеристиками нечетких оценок параметров, к которым относятся (рис. 2): Δ – ширина интервала толерантности; f – середина интервала толерантности; β, γ – левый и правый коэффициенты неопределенности [6]. При этом процедура актуализации нагрузок реализуется в два этапа.

Первоначально указанные выше характеристики нечетких оценок нагрузок узлов координируются с аналогичными характеристиками оценки телеизмерений («ТИ» на рис. 2) суммарной нагрузки согласно условию, что в большей степени корректируются не только большие по величине нагрузки (характеристика f), но и те оценки нагрузки, которые имеют более высокий уровень неопределенности (характеристики Δ, β, γ) – рис. 2.

На втором этапе процедуры актуализации учитывается, что степень неопределенности полученных оценок нагрузок будет тем выше, чем больше количество узлов, для которых имеется оперативное измерение их фактической суммарной нагрузки. При этом исходят из следующего. Если гипотетически предположить, что от некоторой точки сети, где проводилось телеизмерение нагрузки, питается только один нагрузочный узел, то после актуализации оценка его нагрузки должна быть полностью идентична результату телеизмерения. При возрастании количества узлов, для которых осуществлялось измерение нагрузки, увеличивается число комбинаций возможных значений нагрузок отдельных узлов, которые в сумме будут соответствовать результату телеизмерения.

Аналогичные соображения лежат и в основе процедуры расчета потокораспределения в сети. Например, для линии РС с источником РГ соответствующие характеристики нечеткой оценки нагрузки для некоторого участка $i, i+1$ (рис. 2) определяются на основании следующих выражений:

$$f''_{i,i+1} = \sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} f''_{g\alpha} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} f''_{qPГ\alpha},$$

$$\Delta''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \Delta''_{g\alpha} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \Delta''_{qPГ\alpha} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

$$\beta''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \beta''_{g\alpha} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \beta''_{qPГ\alpha} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

$$\gamma''_{i,i+1} = \left(\sum_{g \in \Pi_{i,i+1}} \gamma''_{g\alpha} + \sum_{q \in \Pi_{i,i+1}} \gamma''_{qPГ\alpha} \right) (\sqrt{n_{i,i+1} + k_{i,i+1}})^{-P},$$

где $n_{i,i+1}$ – количество узлов нагрузок, которые получают питание от участка сети $i, i+1$; $k_{i,i+1}$ – количество источников РГ, мощность от которых согласно расчету потокораспределения протекает по участку сети $i, i+1$; $f''_{g\alpha}, \Delta''_{g\alpha}, \beta''_{g\alpha}, \gamma''_{g\alpha}$ – соответствующие характеристики (рис. 2) функций принадлежности нечетких оценок нагрузок узлов (после реализации второго этапа актуализации), получающих питание от участка $i, i+1$; $g \in \Pi_{i,i+1}$ – означает, что при расчетах учитываются соответствующие характеристики только тех узлов нагрузок g , которые получают питание от участка сети $i, i+1$; $f''_{qPГ\alpha}, \Delta''_{qPГ\alpha}, \beta''_{qPГ\alpha}, \gamma''_{qPГ\alpha}$ – характеристики функций принадлежности нечетких оценок мощностей источников РГ, установленных в узлах, которые получают питание от участка $i, i+1$; $q \in \Pi_{i,i+1}$ – означает, что при расчетах учитываются характеристики только тех узлов нагрузки q , в которых установлены источники РГ и которые получают питание от участка сети $i, i+1$.

При расчете потокораспределения в соответствии с предложенным подходом оценка нагрузки последнего участка линии всегда строго соответствует актуализированной оценке нагрузки ее последнего узла. Одновременно с этим оценка нагрузки головного участка линии всегда будет совпадать с нечеткой оценкой суммарной нагрузки, определенной по результатам телеизмерений.

Важным достоинством предложенного подхода является возможность не только рационально и объективно учесть существующую неопределенность информации, но и определить потокораспределение в сети при выполнении условий первого закона Кирхгофа.

На основании полученных нечетких оценок нагрузок на участках сети появляется возможность вычислить такие показатели режима как потери мощности (энергии) и напряжений, которые, очевидно, по аналогии с оценками нагрузок будут также представлены нечеткими множествами с трапециевидальными функциями принадлежности.

Так для линии РС (рис. 2) потери электроэнергии за период времени T составят

$$\Delta \tilde{A}_{\Sigma} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n-1} 3 \tilde{I}_{i,i+1,t}^2 R_{i,i+1}.$$

Эффект, связанный с применением РГ, в плане их влияния на потери электрической энергии может быть определен в результате двух последовательных расчетов (соответственно без и с источником РГ), а полученная при этом оценка будет представлена нечетким множеством с трапецидальной функцией принадлежности.

Влияние источников РГ на режим напряжений теоретически можно оценить в процессе расчета изменения его потерь на соответствующих элементах сети. Однако данный подход является чрезвычайно трудоемким, поскольку это связано с объемными расчетами, оперирующими нечеткими числами, требует проведения дополнительного анализа относительно целесообразности изменения параметров имеющихся в сети средств централизованного регулирования напряжения вызванного появлением РГ и в случае положительного решения – оценки изменения отклонений напряжения у всех потребителей, получающих питание от трансформатора подстанции, на котором был изменен закон регулирования напряжения.

В связи с этим представляется более предпочтительным на начальной стадии проектирования использовать для данной цели экспертные оценки. При этом можно ориентироваться на следующие соображения.

Анализ опыта применения РГ показал, что в плане ее влияния на режим напряжения могут сложиться ситуации, когда внедряемый генерирующий источник позволяет: без изменения параметров средств централизованного регулирования напряжения исключить или снизить объем потребления электрической энергии при отклонениях напряжения выходящих в исходном режиме за допустимые пределы; обеспечить аналогичный результат только после соответствующего изменения параметров средств регулирования напряжения; не повлиять на режим напряжений, который практически соответствовал требованиям действующего стандарта; после соответствующего изменения параметров средств регулирования напряжения сохранить в сети допустимые отклонения напряжения; ухудшить режим напряжений даже после попытки соответствующей перенастройки параметров средств централизованного регулирования.

В этом случае эксперты могут оценить режимы, которые формируются в РС после внедрения источников РГ, с точки зрения их воздействия на уровни напряжений посредством лингвистических характеристик в соответствии с приведенной выше классификацией возникающих при этом ситуаций. Используемые при этом лингвистические переменные (например, значительное улучшение режима напряжений без необходимости перенастройки средств регулирования напряжения (1); улучшение режима напряжений, после незначительного изменения параметров средств регулирования напряжения (2); улучшение режима напряжений после кардинального изменения параметров средств регулирования напряжения (3); нейтральное воздействие на режим напряжений (4); сохранение исходного уровня недопустимых отклонений напряжения после изменения параметров средств регулирования напряжения (5); незначительное ухудшение режима напряжений (6); существенное ухудшение режима напряжений (7), что нельзя устранить средствами централизованного регулирования) описываются соответствующими функциями принадлежности, в частности трапецидального вида [7] (рис. 3).

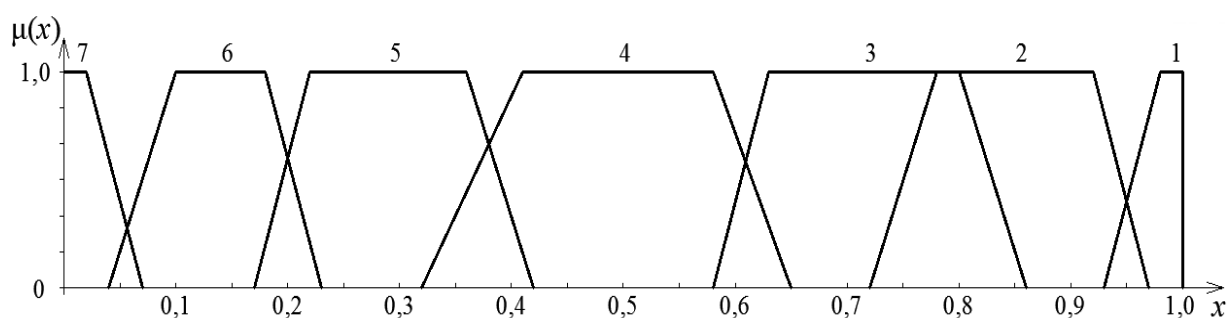


Рисунок 3

Таким образом, оценки влияния РГ на рассматриваемые показатели режима будут представлены нечеткими количественными и качественными величинами с трапецидальными (или, в отдельных случаях, треугольными) функциями принадлежности.

С целью комплексной оценки альтернативных вариантов применения РГ с позиций их влияния на характеристики режима РС, в дальнейшем применяются методы многокритериального принятия решений. В работе [8] была рассмотрена возможность использования методов *VIKOR* и *TOPSIS*, а также алгоритма Беллмана-Заде для многокритериального ранжирования альтернатив при детерминированном задании исходных данных. Основная идея здесь заключается в том, что совпадение или, по крайней мере, близость рядов ранжирования альтернатив, полученных при использовании различных методов, позволяет более обоснованно выбрать оптимальный вариант применения РГ. При существенном различии полученных рядов ранжирования возникает необходимость в дальнейшем анализе, в частности, за счет привлечения дополнительных критериев для возможности принятия обоснованного окончательного решения. Вместе с

тем появление неопределенной информации в качестве исходных данных потребует соответствующей модификации указанных выше методов многокритериального принятия решений.

В связи с этим ниже рассматривается модифицированный метод TOPSIS [9], который позволяет проранжировать альтернативы на основе одновременной оценки их удаленности относительно идеального и наихудшего решений, применительно к задаче выбора оптимального варианта применения РГ. Соответствующий алгоритм решения задачи, принимая во внимание необходимость оперирования с нечеткими величинами, строится следующим образом.

1. На основании определенных для каждого варианта применения распределенной генерации количественных показателей, характеризующих в данном случае потери электрической энергии, а также лингвистической оценки, отражающей режим напряжений, формируется, так называемая, матрицы решений, строки которой отвечают рассматриваемым альтернативам, а столбцы – критериям. При этом в ячейки матрицы заносятся соответствующие оценки показателей режима, которые представляются характерными параметрами (a_1, a_2, a_3, a_4) отвечающих им нечетких множеств в данном случае с трапецидальными функциями принадлежности (рис. 1).

2. С целью исключения влияния различной размерности рассматриваемых показателей на процесс принятия решений, предварительно все они должны быть нормализованы. При этом, учитывая правила выполнения арифметических операций с нечеткими числами [5], данная операция осуществляется следующим образом

– для факторов, предполагающих максимизацию

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{a_{ij1}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij2}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij3}}{\max_i a_{ij4}}, \frac{a_{ij4}}{\max_i a_{ij4}}, \mu_{ij} \right), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n; \quad (2)$$

– для факторов, требующих минимизации

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij4}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij3}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij2}}, \frac{\min_i a_{ij1}}{a_{ij1}}, \mu_{ij} \right), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где m – число учитываемых критериев; n – количество рассматриваемых альтернатив.

3. Определяем наилучшее (\tilde{V}_i^+) и наихудшее (\tilde{V}_i^-) значения для всех рассматриваемых показателей (критериев) $i = 1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. принимая во внимание, подлежит ли данный критерий максимизации или минимизации).

4. Для всех элементов нормализованной матрицы решений, элементы которой определены в соответствии с (2) и (3), находим детерминированные аналоги, представляемые центрами тяжести функций принадлежности соответствующих нечетких чисел, которые, например для некоторого нечеткого числа \tilde{A} с трапецидальной функцией принадлежности вычисляются следующим образом [10]:

$$y_A = \frac{\mu_A \left(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} \right) + 2}{6}, \quad x_A = \frac{y_A(a_2 + a_3) + (a_1 + a_4)(\mu_A - y_A)}{2\mu_A}.$$

5. Вычисляем расстояния между всеми элементами матрицы решений относительно наилучшего и наихудшего решений

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij})]^2}, \quad d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m [d(\tilde{V}_i^-, \tilde{V}_{ij})]^2}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

При вычислениях реализуемых согласно (4) исходим из того, что расстояние между двумя нечеткими числами \tilde{A} и \tilde{B} определяется в соответствии с формулой

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{(y_A - y_B)^2 + (x_A - x_B)^2}{2}}.$$

6. На заключительном этапе вычисляем показатель

$$C_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-}, \quad j = 1, \dots, n,$$

где n – количество рассматриваемых альтернатив.

После этого все альтернативы $A^{(j)}$, $j = 1, \dots, n$ согласно стандартному методу TOPSIS [11] могут быть проранжированы в соответствии с убыванием величины C_j . Таким образом, альтернатива, которой соответствует максимальное значение показателя C_j , может рассматриваться в качестве наилучшего компромиссного решения задачи.

Выводы. Эффективное использование РГ, которая в последние годы динамично увеличивает свой удельный вес в энергетических балансах практически всех стран мира, требует тщательной оценки ее влияния на режимные показатели электрических сетей. Решение данной задачи затрудняется отсутствием в существующих отечественных системах электроснабжения адекватного для данной цели информационного обеспечения. Это делает актуальными вопросы учета фактического уровня неопределенности данных как относительно нагрузок узлов сети, так и выходной мощности интегрируемых в них источников энергии (в первую очередь возобновляемых) при оценке влияния РГ на комплекс режимных показателей электрических сетей.

Таким образом, разработанные методы и алгоритмы, позволяющие сформировать нечеткие оценки нагрузок и выходных характеристик источников РГ в виде нечетких множеств на основе агрегирования ретроспективных как прямых, так и косвенных данных позволят повысить адекватность моделирования режимов РС как при отсутствии, так и при наличии в их структуре источников РГ. Также продемонстрировано, каким образом при постепенном оснащении РС средствами телеизмерений, получаемые оперативные данные могут быть интегрированы в процедуры расчета потокораспределения и вычисления таких показателей как потери энергии и напряжения в элементах сети с целью обоснованного снижения уровня неопределенности определяемых параметров.

Помимо этого, показана возможность привлечения характеристик качественного характера (например, лингвистических экспертных оценок, отражающих последствия использования РГ с позиций их воздействия на режимы напряжений) для многокритериальной оценки (а при необходимости и сравнения) вариантов применения РГ. Выполненная модификация метода TOPSIS с целью возможности его применения при появлении в качестве исходных данных как нечетких количественных, так и лингвистических переменных открывает возможность для параллельного использования в дальнейшем нескольких методов многокритериального принятия решений с учета неопределенности информации с целью более обоснованного выбора наилучшего решения за счет сравнения полученных в соответствии с каждым из них рядов ранжирования альтернатив.

Реализация полученных в работе результатов позволит повысить интегральную эффективность работы современных РС с подключенными к ним источниками РГ.

Список использованной литературы

1. Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ярмолюк О.С. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір «Врахування фактору невизначеності при моделюванні вихідної потужності вітрових електростанцій». № 52665; заявл. 21.10.2013; зареєстр. 19.12.2013.
2. Кузнецов М.П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2010. № 3. С. 42–48.
3. Попов В.А., Ярмолюк О.С. Евристичний алгоритм моделювання режимів інтегрованих систем електропостачання з урахуванням невизначеності вихідної інформації. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. Спецвип. С. 40–46.
4. Козирський В.В., Тугай Ю.І., Бодунов В.М., Гай О.В. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 5. С. 63–67.
5. Kauffmann A., Gupta M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 361 p.
6. Яхьяева Г. Нечеткие множества и нейронные сети. Москва: Бином, 2006. 316 с.
7. Shih-Hua W., Shyi-Ming C. Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36, is. 2. Pp. 2285–2299.
8. Жаркин А.Ф., Попов В.А., Сахрагард С., Замковой П.А., Сподинская А.В. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределенной генерации в распределительные сети. *Электронное моделирование*. 2016. № 3. С. 99–111.
9. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State of Art Survey. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1981. 259 p.
10. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its application. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1991. 479 p.
11. Mahdavi I., Heidarzade A., Sadeghpour-Gildeh B., Mahdavi-Amiri N. A general fuzzy TOPSIS model in multiple criteria decision making. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45, is. 3–4. Pp. 406–420.

В.А. Попов, д-р. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-3484-4597
О.С. Ярмолюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-8571-2573
М.М. Федосенко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-7077-8334
В.В. Ткаченко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4528-7661
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЗА СУКУПНІСТЮ РЕЖИМНИХ ПОКАЗНИКІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

Розглянуто питання оцінки впливу розосередженої генерації на такі режимні характеристики розподільної мережі як втрати електричної енергії та напруги, надійність електропостачання. Дані фактори доцільно враховувати при порівнянні різних варіантів інтеграції джерел генерації в мережу. Показано, що в розподільних мережах об'єктивна оцінка зазначених характеристик режиму неможлива без урахування невизначеності інформації та запропоновано шляхи вирішення даного завдання. Розроблено методи адекватного врахування фактичного рівня невизначеності інформації при визначенні значень електричних навантажень і вихідної потужності альтернативних джерел розосередженої генерації, моделюванні режимів розподільних мереж і оцінці їх основних показників. Представлено алгоритм багатокритеріального прийняття рішення з урахуванням невизначеності критеріїв та їх різної фізичної природи і розмірності. Реалізація отриманих у роботі результатів дасть можливість підвищити інтегральну ефективність роботи сучасних розподільних мереж із підключеними до них джерелами розосередженої генерації.

Ключові слова: невизначеність інформації, розосереджена генерація, багатокритеріальне порівняння альтернатив.

V. Popov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3484-4597
O. Yarmoliuk, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8571-2573
M. Fedosenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7077-8334
V. Tkachenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-4528-7661
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

COMPARATIVE EVALUATION OF ALTERNATIVES OF DISTRIBUTED GENERATION APPLICATION CONSIDERING MODE OF OPERATION CHARACTERISTICS AND UNCERTAINTY OF INFORMATION

The estimation of influence of the distributed generation on such characteristics of a distribution network mode of operation as losses of electric energy, voltage drops and reliability of power supply are considered. These factors should be taking into account in the process of comparing different alternatives of generating sources integration into the network. It is shown that in the distribution networks an objective assessment of the mentioned above mode of operation characteristics is impossible without taking into consideration the uncertainty of information and ways of solving this problem are proposed. Methods have been developed for adequately taking into account the actual level of information uncertainty for determining of electrical loads and output power of alternative sources distributed generation, modeling of distribution network and assessment of their main indicators. The universal approach to determine the load flow in distribution networks with different levels of information uncertainty, including fuzzy estimates of electrical loads and output capacity of distributed generation sources is developed. An algorithm for multicriteria decision-making, taking into account the uncertainty of the considered criteria, their different physical nature and dimension is presented. Implementation of the results obtained in this work will improve the integrated efficiency of modern distribution networks with distributed generation sources connected to them.

Keywords: uncertainty of information, distributed generation, multicriteria comparison of alternatives.

References

1. Zharkyn A.F., Popov V.A., Yarmoliuk O.S. Certificate of registration of copyright to a work «Considering the factor of uncertainty in modeling the power output of wind power plants». No 52665; stated 21.10.2013; registered 19.12.2013. (Ukr.)
2. Kuznetsov M.P. Methods of forecasting electric power generation by wind power plants. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2010. No 3. Pp. 42–48. (Ukr.)
3. Popov V.A., Yarmoliuk O.S. Heuristic algorithm for modeling the integrated distribution system modes of operation considering initial information uncertainty. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2012. Spetsvyp. Pp. 40–46. (Ukr.)
4. Kozyrskyi V.V., Tugai Y.I., Bodunov V.M., Gai O.V. Integration of renewable energy sources into distributive electric networks of rural regions. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2011. No 5. Pp. 63–67. (Ukr.)
5. Kauffmann A., Gupta M.M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 361 p.
6. Yahiaeva G. Fuzzy sets and neural networks. Moscow: Binom, 2006. 316 p. (Rus.)
7. Shih-Hua W., Shyi-Ming C. Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36, is. 2. Pp. 2285–2299.
8. Zharkyn A.F., Popov V.A., Sakhrhard S., Zamkovoii P.A., Spodynskaia A.V. Multicriteria assessment of alternative variants of integration of distributed generation sources into distribution networks. *Elektronnoe modelyrovanye*. 2016. No 3. Pp. 99–111. (Rus.)
9. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State of Art Surwey. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1981. 259 p.
10. Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its application. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1991. 479 p.
11. Mahdavi I., Heidarzade A., Sadeghpour-Gildeh B., Mahdavi-Amiri N. A general fuzzy TOPSIS model in multiple criteria decision making. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45, is. 3–4. Pp. 406–420.

Надійшла 15.10.2019
Received 15.10.2019

Д.Г. Деревянко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4877-5601

В.С. Панасенко, студент

О.С. Масло, студент

О.М. Загорський, студент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З УСТАНОВКАМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Використання установок відновлювальної енергетики у локальних системах впливає на надійність електропостачання. На даний момент для того щоб оцінити надійність електропостачання у локальних системах з установками відновлювальної енергетики існує велика кількість показників, ніяк не пов'язані один з одним напряму.

Метою статті є проведення аналізу показників надійності електропостачання для локальних систем з установками відновлюваної енергетики. Одним з основних питань в даній темі, незважаючи на велику кількість праць, присвячених дослідженню, є невизначеність методу щодо розрахунку надійності електропостачання в Microgrid. В роботі проведено оцінку показників надійності електропостачання та доведено необхідність введення нових показників для локальних систем з установками відновлюваної енергетики, так як розподілені джерела енергії, зокрема і відновлювані, впливають на режимну та балансову надійність. Такі показники дадуть можливість оцінити надійність не за кожним фактором окремо, а покажуть вплив кожного на загальний стан системи.

Ключові слова: надійність, балансова, режимна, мережа, Microgrid.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Сучасна енергетика в основному базується на невідновлювальних джерелах енергії, які, маючи обмежені запаси, є вичерпними і не можуть гарантувати стійкий розвиток світової енергетики на тривалу перспективу, а їх використання – один з головних факторів, який призводить до погіршення стану навколишнього середовища і його кризового стану.

Одним із пріоритетних напрямків впровадження в Україні принципів побудови енергетики сталого розвитку є модернізація енергетичних систем на основі Smart Grid технологій. Такі технології включають в якості невід'ємної складової впровадження інтелектуальних систем вимірювання та керування енергетичними потоками з використанням пристроїв силової електроніки (СЕ), а також значну частку децентралізації електропостачання за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації (РГ), часто заснованих на нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ).

МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Згідно з сучасними тенденціями розвитку електричних систем, збільшується частка децентралізованого генерування енергії, а розподільні електричні мережі (ЕМ) у сукупності з джерелами РГ розглядаються як локальні електричні системи (ЛЕС).

Термін ЛЕС, відомі на заході як системи Microgrid, відноситься до концепту єдиної підсистеми електричної енергії в комплексі з обмеженою кількістю джерел РГ на основі установок відновлюваної енергетики разом з підключеними навантаженнями. Основні визначення Microgrid систем наведено в таблиці 1 [2].

Базова структура Microgrid-системи зображена на рис. 1, яка показує, що Microgrid-система в основному складається з джерел РГ, поєднаних лініями постійного та змінного струму, системи акумулювання, розподільчої системи та систем контролю і зв'язку.

На рис. 1 зображено ЛЕС з живленням від джерел РГ (ДГ, ФЕС, ВЕС) при паралельній роботі з мережею: ВЕС – вітроелектрична система; ВК – вітроколесо; М – мережа.

Дотримання нормованого рівня якості електроенергії та оптимальний розподіл потужності забезпечується загальною та локальними СК. Надійність функціонування такого об'єкту залежить від надійності кожного елемента, узгодженості їхніх параметрів та структурних зв'язків між ними.

Так як джерела РГ мають непостійний потенціал виникає необхідність забезпечення умов надійної паралельної роботи різних джерел РГ у складі ЛЕС, а також надійної паралельної роботи централізованих ЕМ з ЛЕС, підтримування збалансованого режиму між споживаною та генерованою електричними потужностями в ЛЕС, надійної та безперебійної передачі електроенергії через мережі ЛЕС споживачам, які живляться від джерел РГ.

безперервної поставки електричної енергії споживачам, щоб задовольни їх потреби. Поняття надійності включає в себе такі властивості як безвідмовність, довговічність і ремонтпридатність.

Таблиця 1 – Загальноприйняті визначення Microgrid систем

Організація	Визначення
CIGRE	Системи Microgrid включають в себе розподільні мережі низької напруги з джерелами РГ, акумулюючими пристроями і керованими навантаженнями, що працюють підключеними до основної мережі живлення або в острівному режимі, керовано, скоординованим чином.
U.S. Department of Energy Microgrid Exchange Group	Системою Microgrid є група взаємопов'язаних навантажень і розосереджених енергетичних ресурсів в межах чітко визначених електричних кордонів, яка діє як єдиний контрольований об'єкт по відношенню до мережі. Систему Microgrid можна підключати і відключати від мережі, щоб вона могла працювати як паралельно до мережі, так і в острівному режимі.
Siemens	Системою Microgrid є регіонально обмежена енергетична система розосереджених енергетичних ресурсів, споживачів і інколи система накопичення. Котра оптимізує один або декілька з наступних параметрів: якість електроенергії та надійність, сталість розвитку і економічні вигоди, і може безперервно працювати в автономному чи паралельному режимі шляхом зміни стану з'єднання з мережею.
Congressional Research Service (CRS)	Системою Microgrid є будь-яка мала або місцева електроенергетична система, яка не залежить від загальної електричної мережі. Наприклад, це може бути когенераційна система на основі двигуна внутрішнього згоряння природного газу або дизель-генераторів, використання відновлюваних джерел енергії, або паливних елементів.

Але ця термінологія не стала загальноприйнятною, вона не охопила і не впорядкувала множину термінів з надійності. Так в джерелах використовуються поняття структурної, режимної (функціональної) та балансової надійності. Такий поділ, виконано умовно, по-перше, для спрощення розв'язання задачі оцінювання надійності складних мереж, по-друге, на основі кількісних оцінок за складовими можна намітити заходи з підвищення рівня надійності.

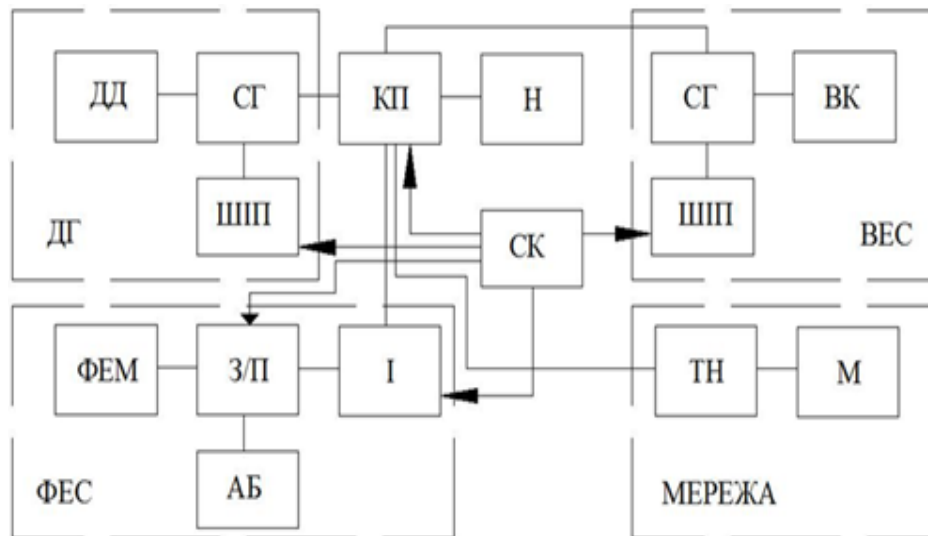


Рисунок 1 – Блок-схеми локальної ЕЕС – Microgrid

Зміни в електроенергетиці, пов'язані з впровадженням ринкових відносин та розосередженого генерування, потребують оновлення термінології, на основі якого можна виконати декомпозицію задачі оцінювання надійності. Оскільки оцінювання надійності навіть розподільних електричних мереж в сучасних умовах є достатньо складною задачею.

В ринкових умовах визначальним під час оцінювання надійності є споживач. При цьому надійність самого об'єкту енергетики, яка оцінюється вартісними показниками (затратами на її забезпечення, вартості ремонтів пошкодженого обладнання, тощо) стає ніби то внутрішньою справою постачальника продукції і послуг.

Так в залежності від системи допущень та обмежень, а також від використовуваного математичного апарату задача розрахунку надійності умовно може бути розділена на три групи, які характеризують надійність ЕЕС: структурна (схемна), режимна (функціональна) і балансова надійності (див. Рис. 2).

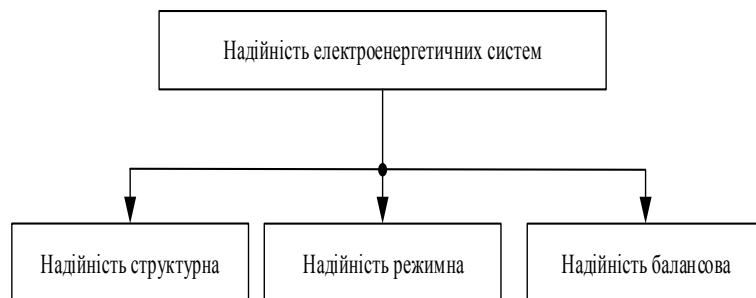


Рисунок 2 – Класифікація надійності електроенергетичних систем за моделями розрахунку

Під структурною надійністю розуміють надійність об'єкту, коли розрахункова модель визначається схемою електричних з'єднань; під режимною надійністю розуміють надійність об'єкту, коли розрахункова модель враховує режими завантаження (функціонування) елементів об'єкту (режимна надійність може бути статичною, якщо мова йде про усталені або тривалі післяаварійні режими, і динамічною, якщо мова йде про перехідні режими); під балансовою надійністю розуміють надійність об'єкту, коли розрахункова модель визначається балансом виробництва і споживання продукції без врахування обмежень з її передачі [1].

Відповідно до визначень режимної та балансової надійності можна однозначно констатувати вплив на них розподіленої генерації і відновлюваних джерел електроенергії зокрема. Оскільки розвиток ВДЕ, стимульований державою, набирає обертів і ми говоримо про розподілену генерацію на рівні десятків і сотень мегават, що є суттєвим як на рівні конкретних елементів електроенергетичних систем (режиму роботи та завантаження) так і на рівні забезпечення балансу між згенерованою і спожитою потужностями.

За Законом України "Про електроенергетику" № 575/97-ВР постачальники електроенергії зобов'язані забезпечити надійне постачання споживачів якісною електроенергією найбільш економічним способом. Відповідно до постанови № 232 Національної комісії регулювання електроенергетики України від 17.02.2011 Про затвердження звіту № 17 – НКРЕ (щокварталу) "Звіт про надійність електропостачання" і № 18 – НКРЕ (щокварталу) "Звіт про виконання комерційної якості обслуговування" та інструкцій щодо їх заповнення, надійність електропостачання споживачів в Україні показники надійності визначені наступним чином (табл. 2):

Таблиця 2 – Показники експлуатаційної надійності згідно IEEE 1366

№	Показник надійності	№	Показник надійності
1	SAIFI	2	ASIFI
	SAIDI		ASIDI
	CAIDI		MAIFI
	CTAIDI	3	MAIFLe
	CAIFI		CEMSMIn
	ASAI		
	CEMIn		
CELID			

Описані вище показники були взяті з стандарту IEEE 1366 – «Керівництво по індексах (вимірювання) надійності засобів розподілу електроенергії». Даний стандарт стосується експлуатаційної надійності та умовно розділяє показники в розподільних мережах (див. табл. 3).

Під час вибору показників, які характеризують балансову надійність розподільних електричних мереж з РДЕ, необхідно враховувати прості і очевидні рекомендації. Їх число повинно бути мінімальним і в той же час достатнім для прийняття рішень з забезпечення необхідного рівня балансової надійності. Необхідно уникати складних ПБН, вони повинні мати простий фізичний зміст і допускати можливість оцінювання значень різними методами. Вибрані ПБН розподільної електричної мережі з ВДЕ повинні бути чутливими до збурень, які призводять до зниження або підвищення надійності системи (зміни режиму генерації відновлюваних джерел електричної енергії).

Зазначені вище показники можуть бути використані лише при визначенні експлуатаційної та балансової надійності системи, що зазвичай використовуються при паралельній роботі з мережею, тому в ЛЕС необхідно використовувати показники режимної надійності, а саме (формули 1-4) [3]:

Очікувана втрата навантаження:

$$LOLE = \sum_{i=1}^n P_i(C_i - L_i) \quad (1)$$

Таблиця 3 – Показники експлуатаційної надійності згідно IEEE 1366

Показник надійності	Визначення	Показник надійності	Визначення
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index / Показник середньої частоти відмов	ASIFI	Average System Interruption Frequency Index / Показник середньої частоти відмов по навантаженню
SAIDI	System Average Interruption Duration Index / Показник середньої тривалості відмов		
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index / Показник середньої тривалості відмов окремих споживачів	ASIDI	Average System Interruption Duration Index / Показник середньої тривалості відмов
CTAIDI	Customer Total Average Interruption Duration Index / Показник кількості споживачів, що мають перерви в електропостачанні	MAIFI	Momentary Average Interruption Frequency Index / Показник частоти короткочасних відмов
CAIFI	Customer Average Interruption Frequency Index / Показник середньої частоти відмов	MAIFe	Momentary Average Interruption Event Frequency Index / Показник подій, що спричинили короткочасні відмови
ASAI	Average Service Availability Index / Показник готовності надання послуг	CEMSMIn	Customers Experiencing Multiple Sustained Interruption and Momentary Interruption Events / Кількість споживачів що одночасно мають тривалі та короткочасні відмови
CEMSIn	Customers Experiencing Multiple Interruptions / Кількість споживачів, що мають багатократні перерви в електропостачанні		
CEMID	Customers Experiencing Long Interruption Durations / Кількість споживачів, які мають тривалі перерви в електропостачанні		

Енергетичний індекс надійності:

$$EIR = 1 - LOEE \quad (2)$$

$$LOEE = \sum_{k=1}^n \frac{E_k \cdot P_k}{E} \quad (3)$$

Еквівалентний коефіцієнт неготовності:

$$EFOR = \frac{\text{ймовірність відмови агрегату}}{\text{кількість агрегатів}} \quad (4)$$

Режимна надійність ЕЕС залежить від погодних умов, складу мережевого і генерувального обладнання, об'ємів резерву активної і реактивної потужності, поточного режиму функціонування системи (значення вузлових напруг, завантаженню мережевого обладнання, тощо).

Необхідною умовою надійного функціонування ЕЕС є допустимість режиму, тобто його знаходження в області, яка визначається допустимими межами за струмом, напругою, статичною стійкістю і ін. В цьому випадку говорять про виконання умови критерію надійності n=0. Перевірка цієї умови зводиться до контролю фактичних значень потоків потужності, напруги та інших режимних параметрів і порівнювання їх з заданими граничними значеннями.

До тепер відсутні показники режимної надійності, які б знайшли широке застосування. Особливо це стосується показників режимної надійності, які відображають імовірнісний характер роботи електроенергетичних систем.

Оскільки врахувати особливості роботи ВДЕ в критерії n-і проблематично в основному через імовірнісний характер роботи останніх, тому необхідно обрати показники, за якими можна буде оцінювати вплив розподіленого генерування на режимну надійність.

Для того щоб відобразити «тяжкість» або «важливість» відмови в системі, в країнах Європи, останні роки широкого використання набули показники надійності, які зображено на рис. 3 [3].

З наведеної діаграми можна побачити, що найбільш використовуваним показником є показник надійності ASAI.

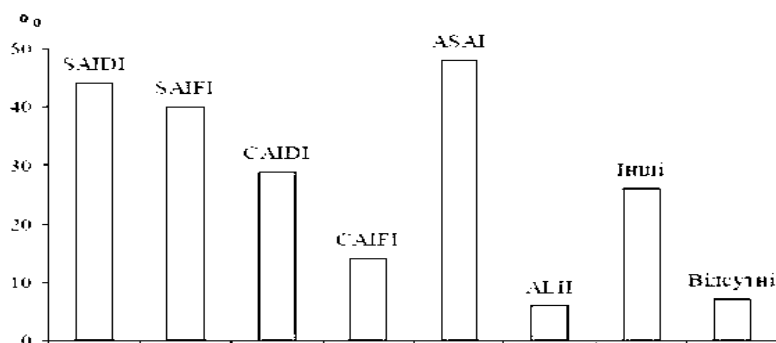


Рисунок 3 – Частота використання інтегральних показників надійності західними країнами

Використання даного показника, для оцінювання надійності роботи ЛЕС, як складових електричних мереж, обумовлено тим, що показник дозволяє оцінити збитки власників станції на базі ВДЕ, наприклад ФЕС, що розміщена поблизу споживачів, в разі невідпуску електроенергії внаслідок аварії на ЛЕП на шляху до споживача або до ПС.

ВИСНОВКИ. Розподілені джерела енергії, зокрема і відновлювані джерела енергії як основна їх складова, впливають на режимну та балансову надійність. Для оцінювання впливу необхідно обрати показники, які б дозволяли врахувати особливості джерел енергії. Це можуть бути коефіцієнти забезпечення балансу, коефіцієнти якості напруги, а також коефіцієнт стабільності.

Література

1. Рибак В.П.: «Оцінювання впливу відновлюваних джерел електроенергії на якість електропостачання». Магістерська кваліфікаційна робота - Вінниця: ВНТУ, 2015. – 102 с.
2. Лежнюк, П. Д. Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», – 2018. – № 45 (1321). – С. 25-31. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.04.
3. Денисюк С.П. Оцінка ефективності сумісної роботи розосереджених джерел генерації електроенергії, включаючи відновлювальні, в електроенергетичних системах / Денисюк С.П., Базюк Т.М., Дерев'яно Д.Г., – Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – №3(80). – С.54–59.
4. Дерев'яно Д. Г., Аналіз особливостей забезпечення стійкості та надійності систем з інтеграцією джерел розосередженої генерації / Дерев'яно Д. Г., Суменко К.Ю., Процько В.Г. // Матеріали конференції «Енергетика. Екологія. Людина». – 2013. – С. 432–439.
5. CIGRE, International Council on Large Electricity Systems, <http://www.cigre.org>.
6. Zhuikov V., Petergerya J. Intellectual systems to control energy generation and consumption in local objects // Proceeding of 2-nd Conference “Power Electronic Devices Compatibility” PEDC–2001. – Poland. – Zielona Gora: Technical University Press. – P. 208–212.
7. Береговський В.З., Адаптивне енергоефективне керування перетворювачами електричної енергії з урахуванням режиму споживання / Береговський В.З., Петергеря Ю.С. – Техн. електродинаміка. Темат. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. –2001. – Ч.3. – С.27–29.
8. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю.І. Якименко, Є.І. Сокол, В.Я. Жуйков, Ю.С. Петергеря, О.Л. Іванін. – К.: ІВЦ „Політехніка”, 2001. – 114 с.
9. Ackerman T., Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network // Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES. – 2000. – Vol. 2. – P. 1357–1362.
10. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. – Техн. електродинаміка. – 2011. – №1. – С.46–53.
11. Wang S. Distributed generation and its effect on distribution network system // Electricity Distribution – Part 1. 20th International conference and exhibition on. – 2009. – P. 1–4.
12. Dolezal J., Sautarius P., Tlustý J. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system // Quality and Security of Electric Power Delivery Systems.CIGRE/IEEE PES International Symposium. – 2003. – P. 204–207.
13. Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D. Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks // Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU. – 2007. – Vol. 3. – № 1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1079.
14. Дерев'яно Д. Г., Аналіз особливостей підключення розосередженої генерації при побудові систем Microgrid / Дерев'яно Д. Г., Попик М.Ю. // Матеріали конференції «Енергетика. Екологія. Людина». –2013. – С. 348–357.
15. Baggini A.B. Handbook of Power Quality // Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. – 2008. – 642 p.

16. Воробьёв С.Ю. Вопросы повышения надёжности работы энергосистем/ Воробьёв С.Ю. – Энергетик. – №3. – 2006.

17. Дьяков А.Ф. Проблемы надёжности и безопасности электроснабжения потребителей / Дьяков А.Ф. – Энергетик. – №2

18. Томилов В.В., Управление качеством продукции энергосистем. / Томилов В.В., Голубкова Р.Р., Еловенко В.Г. – СПб.: Изд.-во СПбГУЭФ, 2000. С.30 – 31.

19. European standard EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC TC 8X, 2006. NRS-048-2, Electricity Supply – Quality of Supply Part 2: Voltage characteristics, compatibility levels, limits and assessment methods.

УДК 621.311

Д.Г. Деревянко, канд. техн. наук, **ORCID 0000-0002-4877-5601**

В.С. Панасенко, студент

А.С. Масло, студент

А.Н. Загорский, студент

**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ В ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С УСТАНОВКАМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Использование установок возобновляемой энергии в локальных системах влияет на надёжность электроснабжения. На данный момент для того чтобы оценить надёжность электроснабжения в локальных системах с установками возобновляемой энергии существует большое количество показателей, никак не связаны друг с другом напрямую.

Целью статьи является проведение анализа показателей надёжности электроснабжения для локальных систем с установками возобновляемой энергии. Одним из основных вопросов в данной теме, несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию, является неопределённость метода по расчету надёжности электроснабжения в Microgrid. В работе проведена оценка показателей надёжности электроснабжения и доказана необходимость введения новых показателей для локальных систем с установками возобновляемой энергии, так как распределенные источники энергии, в том числе возобновляемые, влияют на режимную и балансовую надёжность. Такие показатели позволят оценить надёжность не по каждому фактору отдельно, а покажут влияние каждого на общее состояние системы.

Ключевые слова: надёжность, балансовая, режимная, сеть, Microgrid.

D. Derevyanko, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID 0000-0002-4877-5601**

V. Panasenko, student

A. Maslo, student

A Zagorsky, student

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ASSESSMENT OF RELIABILITY IN LOCAL SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

The use of renewable energy installations in local systems affects the reliability of power supply. At the moment, in order to assess the reliability of power supply in local systems with renewables, there is a large number of indicators that are not directly related to each other.

Reliability is one of the key concepts in electricity. The reliability of the power system is a feature of the continuous supply of electricity to consumers to meet their needs. The concept of reliability includes such features as failure-free, durability and maintainability. But this terminology has not become commonplace, it has not embraced or streamlined many terms for reliability. Thus, many authors use the concepts of structural, mode (functional) and balance reliability. This separation is conditional, first, to simplify the solution of the task of assessing the reliability of complex networks, and secondly, based on quantitative assessments of the components, measures can be taken to improve the level of reliability.

Changes in energy sector related to the implementation of market relations and distributed generation require an update of terminology that can be used to decompose the reliability assessment task. Because assessing the reliability of distribution grids in today's environment is quite a challenge.

The purpose of the article is to analyze the reliability of power supply for local systems with renewables. One of the main issues in this topic, despite the large amount of research work involved, is the uncertainty of the method for calculating the reliability of power supply in Microgrids. The paper assesses the reliability of power supply and proves the need to introduce new indicators for local systems with renewables, since distributed energy sources, including renewables, affects systems reliability. Such indicators will allow assessing the reliability by each factor individually, and will show the impact of each factor on the overall state of the system.

Keywords: *reliability, balance, mode, network, Microgrid.*

References

1. Rybak VP: "Assessing the impact of renewable energy sources on the quality of electricity supply". Master's qualification work - Vinnitsa: VNTU, 2015. - 102 p.,
2. Lezhniuk, PD The influence of distributed generation on the reliability of electrical networks / PD Lezhniuk, VO Komar, SV Kravchuk, IV Kotilko // Bulletin of NTU "KPI", Series: New solutions in modern technologies. - Kharkiv: NTU "KPI". - 2018. - № 45 (1321). - P. 25-31. - doi: 10.20998 / 2413-4295.2018.45.04.
3. Denisyuk S.P. Assessment of the Effectiveness of the Collaboration of Dispersed Electricity Generation Sources, including Renewables, in Power Systems / SP Denisyuk, TM Bazyuk, DG Derev'yanko, - Bulletin of the Kremenchuk National University named after Mikhail Ostrogradsky. - 2013. - №3 (80). - P.54-59.
4. DG Derev'yanko, Analysis of features of stability and reliability of systems with integration of sources of dispersed generation / Derev'yanko DG, Sumenko K.Yu., Protsko V.G. // Materials of the conference "Energy. Ecology. Man". - 2013. - P. 432-439.
5. CIGRE, International Council on Large Electricity Systems, <http://www.cigre.org>.
6. Zhuikov V., Petergerya J. Intellectual systems for control of energy generation and consumption in local objects // Proceeding of the 2-nd Conference "Power Electronic Devices Compatibility" PEDC – 2001. - Poland. - Zielona Gora: Technical University Press. P. 208-212.
7. Beregovsky VZ, Adaptive energy efficient control of electric energy converters with regard to the consumption mode / Beregovsky VZ, Petergerya Yu.S. - Tech. electrodynamic. Subject. issue of Power Electronics and Energy Efficiency. –2001. - Part 3. - P.27-29.
8. Renewable energy sources in local facilities / Yu.I. Yakimenko, EI Sokol, V.Ya. Zhuykov, Yu.S. St. Petersburg, OL Ivanin. - K.: Polytechnic Research Center, 2001. - 114 p.
9. Ackerman T., Knyazkin V. Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network // Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE / PES. - 2000. - Vol. 2. P. 1357-1362.
10. OV Kyrlyenko, Technical Aspects of Implementation of Distribution Generation Sources in Electric Networks / OV Kyrlyenko, VV Pavlov, LM Lukyanenko. - Tech. electrodynamic. - 2011. - №1. - P.46-53.
11. Wang S. Distributed generation and its effect on the distribution network system // Electricity Distribution - Part 1. 20th International conference and exhibition on. - 2009. - P. 1-4.
12. Dolezal J., Sautarius P., Tlustý J. The effect of dispersed generation on power quality in the distribution system // Quality and Security of Electric Power Delivery Systems.CIGRE / IEEE PES International Symposium. - 2003. P. 204-207.
13. Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D. Impact of Embedded Generation on Voltage Quality of Distribution Networks // Electrical Power Quality and Utilization, EPQU. - 2007. - Vol. 3. - No. 1. [Electronic resource]. - Access mode: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1079.
14. DG Derev'yanko, Analysis of Peculiarities of Connecting Generated Generation in Microgrid Systems Building / DG Derev'yanko, M. Yu. // Materials of the conference "Energy. Ecology. Man". –2013. - P. 348-357.
15. Baggini A.B. Handbook of Power Quality // Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. - 2008. - 642 p.
16. Vorobyov S.Yu. Questions of increase of reliability of work of power systems / Vorobyov S.Yu. - An energy engineer. - №3. - 2006.
17. Diakov AF Problems of reliability and safety of electricity supply to consumers / Dyakov AF - An energy engineer. - №2
18. VV Tomilov, Power quality management of power systems. / Tomilov VV, Golubkova RR, Elovenko VG - St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2000. P. 30 - 31.
19. European standard EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC TC 8X, 2006. NRS-048-2, Electricity Supply - Quality of Supply Part 2: Voltage characteristics, compatibility levels, limits and assessment methods.

Надійшла 25.10.2019

Received 25.10.2019

О.С. Маляренко, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., ORCID 0000-0001-5882-916X

Н.Ю. Майстренко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-1757-1665

В.В. Станиціна, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-1005-6185

О.Ю. Богославська, канд. екон. наук, ORCID 0000-0002-4286-7505

Інститут загальної енергетики НАН України

УДОСКОНАЛЕНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ДОВГОСТРОКОВУ ПЕРСПЕКТИВУ

У статті надано розвинутий комплексний метод прогнозування енергоспоживання, що включає удосконалену методику прогнозування енергоспоживання нормативним методом та методику узгодження прогнозних рішень векторним методом. За удосконаленою методикою нормативним методом виконуються розрахунки прогнозу на TOP («Країна») та DOWN-рівнях («Разом за видами економічної діяльності (ВЕД)») за показниками енергоємності валової доданої вартості (ВДВ) відповідного ієрархічного рівня (країна чи ВЕД) з урахуванням уточненої методики визначення повного потенціалу енергозбереження (структурного та технологічного), виділенням особливостей визначення структурного потенціалу енергозбереження для енергетичного сектору, уточненням методичного підходу до визначення прогнозного попиту на паливо для енергетичного сектору, що враховує прогнозні структури електро- та теплогенерувальних потужностей цього сектору. За сценарним підходом досліджено вплив зміни структури економіки України на рівні споживання палива та енергії за двома запропонованими варіантами структур економіки. Для визначення прогнозного попиту на енергоресурси для населення розроблено окрему методику, що має особливості для різних видів енергоресурсів. Прогноз споживання електроенергії та палива для населення визначався через питоме споживання палива та електроенергії на 1 особу у базовому році, демографічний прогноз та обсяги технологічного енергозбереження. Для теплової енергії попит для населення складається з попиту на гаряче водопостачання, який є річним, та попиту на потреби з опалення житлових приміщень, який є сезонним. Остання величина визначається через норми на опалення житлових приміщень, прогноз розвитку житлового фонду, потенціал технологічного енергозбереження за рахунок утеплення існуючих будівель, зниження потреби в тепловій енергії для нових енергоощадних будівель. З використанням векторного методу виконано узгоджені прогнози споживання електричної, теплової енергії, вугілля, природного газу, нафтопродуктів (без населення) з подальшим додаванням потреби населення на паливо та енергію та оцінкою прогнозного попиту на енергоресурси до 2040 р.

Ключові слова: попит, енергоресурси, прогнозування, метод, структура, потенціал енергозбереження.

Вступ

Методичні підходи до прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки країни розглядалися в багатьох наукових працях з використанням різних показників та економіко-математичних методів [1–13]. Ці прогнози з методичної точки зору є рівнозначними, але іноді значно відрізняються, що залежить не тільки від закладених економічних показників (прогнозу валового внутрішнього продукту (ВВП), валової доданої вартості (ВДВ), випуску продукції, демографічного прогнозу, темпів росту/зниження енергоємних видів виробництва), а й від обраних показників енергетичної ефективності, до яких відносяться енергоємність ВВП країни, енергоємність ВДВ країни, енергоємність ВДВ видів економічної діяльності (секторів, галузей), випуск продукції на рівні розділів, груп, класів за класифікатором КВЕД-2010 (виробництва) [11–13].

В Інституті загальної енергетики НАН України розвинуто науковий напрям з прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки та для окремих груп споживачів [6, 8–14], для вирішення цієї задачі досліджувався вплив структури економіки та її складових на обсяги енергоспоживання [11–12].

Академіком М.М. Куликом був створений двоетапний (комплексний) метод прогнозування енергоспоживання, який забезпечує безітераційне узгодження прогнозних рішень [9] для підвищення їх достовірності та зменшення кількості варіантів прогнозів. На першому етапі дослідження розробляються прогнози верхнього та нижнього рівнів будь-яким з відомих економіко-математичних методів (в залежності від задачі за верхній рівень може бути вибрано: країна, сектор економіки, регіон, підприємство, за нижній рівень - сектор економіки країни або регіону, вид виробництва, певні групи споживачів), а на

© О.С. Маляренко, Н.Ю. Майстренко, В.В. Станиціна, О.Ю. Богославська, 2019

другому - узгоджуються отримані прогнози розробленим векторним методом.

При застосуванні комплексного методу прогнозування попиту на енергоресурси було здійснено кілька кроків його удосконалення. Першим кроком апробації методу стало узгодження прогнозів верхнього рівня для країни та нижнього – як суми споживання енергетичних ресурсів за видами економічної діяльності (ВЕД) згідно КВЕД-2010 та населення. Отримані результати щодо прогнозу електричної енергії та паливно-енергетичних ресурсів разом (ПЕР-разом) мають високий ступінь співпадіння прогнозів (до 5%), але для видів палива, значна частка яких споживається населенням (природний газ, нафтопродукти), та для теплової енергії, де населення також є значним споживачем, прогнозні дані верхнього і нижнього рівнів суттєво різняться - 14-30%. Тому прогноз споживання палива та енергетичних ресурсів для населення був виключений з нижнього та верхнього рівнів до узгодження прогнозів, а додавався до узгодженого за векторним методом результату, формуючи прогноз енергоспоживання на обраному ієрархічному рівні (країна, регіон). Однак, на рівні країни показник енергоефективності було замінено з енергоємності ВВП на енергоємність ВДВ країни, оскільки населення не створює ВВП. Таке покращення дозволило уточнити прогнози, отримані за різними показниками енергоефективності, та зменшити удвічі різницю між ними. В результаті було сформовано єдину узагальнену модель, в якій одночасно визначаються показники енергоспоживання як верхнього рівня (країна), так і нижнього рівнів (укрупнені секції економіки) за відповідними показниками енергоефективності – енергоємність ВДВ відповідного ієрархічного рівня, з обчисленням узгоджених прогнозних показників з використанням двох його допоміжних значень (мінімального та максимального) і подальшої інтерполяції. На другому етапі удосконалення комплексного методу було розроблено окрему методику прогнозування попиту на паливо для секції D «Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря» (КВЕД-2010), в якій враховано прогнозні структури електро- і теплогенерувальних потужностей до 2040 р., що були розроблені в Інституті загальної енергетики (ІЗЕ НАН України). На наступному етапі уточнено методику визначення потенціалу енергозбереження у разі зміни структури економіки (структурний потенціал) для секції D «Постачання електроенергії та ін.», в якій 99% всього палива витрачалось на перетворення в електричну і теплову енергію. В результаті удосконалення методики створено комп'ютерну програму «Попит» [15-16], що дозволяє обчислити прогнози енергоспоживання для ВЕД для різних сценаріїв розвитку економіки та її складових: секція В «Добувна промисловість і розроблення кар'єрів» та секція С «Переробна промисловість». Технологічний потенціал енергозбереження оцінюється за розробленою в ІЗЕ НАН України методикою [17] і враховується на наступному етапі прогнозування. Тобто програма дозволяє окремо визначити прогнози енергоспоживання для різних варіантів структури економіки або її сектора без урахування технологічного потенціалу та з його урахуванням. Узгодження прогнозних рівнів, отриманих за показниками верхнього і нижнього рівнів економіки здійснювалось за розробленою в ІЗЕ НАН України програмою «SPROS» [18]. Після додавання до узгодженого прогнозу споживання енергоресурсів прогнозованої потреби у ПЕР для населення, та обчислення обсягів можливого експорту палива та електроенергії, формується рівень прогнозного попиту на вид ПЕР для певної структури розвитку економіки.

Мета та завдання дослідження

Метою проведеного дослідження є виявлення енергоефективного сценарію розвитку економіки на основі запропонованого розвинутого комплексного методу, що включає розвинутий нормативний метод:

1) уніфікований методичний підхід до визначення потенціалу енергозбереження від структурних змін в економіці,

2) удосконалено узгодження результатів прогнозів, отриманих на різних ієрархічних рівнях за різними показниками енергоефективності.

Завданням дослідження є аналіз результатів розрахунків прогнозного попиту на ПЕР, отриманих з використанням розвинутого комплексного методу та розроблених програмних засобів «Попит» та «SPROS», за сценарними підходами згідно з розробленими державними документами [19, 20], з наданням рекомендацій щодо енергетичної ефективності цих сценаріїв розвитку економіки.

Матеріали і результати дослідження

Методи дослідження. Для верхнього рівня структури економіки («Країна») прогноз енергоспоживання визначається за формулою:

$$E_{TOPsj}^t = e_{ВДВj}^{\delta} V_{ВДВs}^t \mp \Delta F_{sj}^{\delta-t} = \left(e_{ВДВj}^{\delta} \mp \Delta e_{ВДВj}^{\delta-t} \right) V_{ВДВs}^t, \quad (1)$$

Де $e_{ВДВj}^{\delta}$ – енергоємність ВДВ країни j -виду енергоресурсу у базовому році, кг у.п./грн., кг н.е./грн, МДж/грн; $V_{ВДВs}^t$ – прогнозне значення обсягу валової доданої вартості країни у прогнозованому t -році (t -рік – прогнозний рік дослідження) при s -структурі економіки (s -структура – одна з розрахованих прогнозних структур економіки за прогнозними сценаріями s), тис. грн.; $\Delta F_{sj}^{\delta-t}$ – зниження або перевитрати j -виду енергоресурсу (j -вид енергоресурсу – кожен з досліджуваних видів енергоресурсів, наприклад: електроенергія, теплоенергія, паливо всього тощо) у t -році при зміні структури економіки з базового сценарію на s -сценарій,

тис. т у.п., тис. т н.е., ГДж; $\Delta e_{ВДВj}^{\beta-t}$ – зміна (зменшення/збільшення) енергоємності ВДВ країни при зміні структури економіки відносно базового року, кг у.п./грн., кг н.е./грн, МДж/грн.

Перехід на показник енергоємності валової доданої вартості (ВДВ) країни для прогнозування енергоспоживання дозволяє виявити зміни в енергоспоживанні у разі зміни структури ВДВ. Оскільки ВВП включає ВДВ, що створюється в секторах економіки, з врахуванням податків та виключенням субсидій на продукти, то при одному й тому ж рівні ВВП можуть бути отримані різні обсяги ВДВ країни, що визначаються збільшенням/зменшенням обсягів ВДВ енергоємних секцій економіки відносно ВДВ країни. Одночасно за умови незмінного прогнозного ряду ВВП значення ВДВ можуть змінюватись і, відповідно, буде змінюватись енергоспоживання країни. Споживання населення входить до обсягів споживання країни при обчисленні енергоємності ВВП. Якщо визначається показник енергоємності ВДВ країни, то населення в обсяги споживання енергоресурсів не входить (лише споживання енергоресурсів за рік по секторах економіки). Тобто,

$$e_{ВДВj}^{\beta} = \frac{\sum_i E_{ij}^{\beta}}{V_{ВДВs}^{\beta}}, \quad (2)$$

де

$\sum_i E_{ij}^{\beta}$ – сумарне споживання j -виду енергоресурсу у базовому році всіма i -секціями економіки, тис. т у.п., тис. т н.е., ГДж; $V_{ВДВs}^{\beta}$ – обсяг ВДВ при s -структурі економіки у базовому році, тис. грн.

Зниження споживання енергоресурсів у зв'язку зі зміною s -структури економіки визначається за формулою:

$$\Delta E_{sj}^{\beta-t} = e_{ВДВsj}^{\beta} (V_{ВДВ\beta}^t - V_{ВДВs}^t), \quad (3)$$

де

$e_{ВДВsj}^{\beta}$ – енергоємність ВДВ країни по j -виду енергоресурсу для s -структури економіки за базовий рік; $V_{ВДВ\beta}^t, V_{ВДВs}^t$ – відповідно прогнозні обсяги ВДВ країни для β -базової та прогнозної s -структури економіки, за даними Інституту економіки і прогнозування НАН України.

Для нижнього рівня структури економіки «Разом за ВЕД» (сектори, види економічної діяльності за секціями згідно КВЕД-2010) прогноз енергоспоживання визначається сумою двох складових [14]:

$$E_{DOWN}^t = \sum_i E_{i-D,j}^{\beta} + E_{Dj}^t, \quad (4)$$

де

$\sum_i E_{i-D,j}^{\beta}$ – прогнозні рівні споживання j -виду енергоресурсу у t -році для i -секцій економіки за КВЕД-2010 (i -секція – існуюча секція економіки за діючим класифікатором видів економічної діяльності, наприклад КВЕД-2010), крім секції D; E_{Dj}^t – прогнозні рівні споживання j -виду енергоресурсу у t -році для секції D економіки за КВЕД-2010.

Згідно з [14], сумарні прогнозні рівні споживання енергоресурсів для секцій і секторів (групи секцій) економіки, крім секції D, обчислюються за формулою:

$$E_{i-D,j}^t = \sum_i e_{ВДВij}^{\beta} V_{ВДВi}^t \mp \sum_i \Delta e_{ВДВisj}^{\beta-t} V_{ВДВi}^t - \sum_i \Delta e_{ВДВij}^t V_{ВДВi}^t \pm E_{замj}^t, \quad (5)$$

де

$e_{ВДВij}^{\beta}$ – енергоємність ВДВ j -виду енергоресурсу у базовому році i -секції економіки, кг у.п./грн., кг н.е./грн, МДж/грн; $V_{ВДВi}^t$ – прогнозний обсяг ВДВ i -секції економіки у t -році у постійних цінах (приведених до цін базового року) згідно з [19], тис. грн.; $\sum_i \Delta e_{ВДВisj}^{\beta-t} V_{ВДВi}^t$ – сумарне зниження /збільшення енергоспоживання j -виду енергоресурсу у t -році шляхом зміни s -структури економіки та структури її секторів [16], кг у.п./грн., кг н.е./грн, МДж/грн; $\sum_i \Delta e_{ВДВij}^t V_{ВДВi}^t$ – зниження споживання j -виду енергоресурсу у t -році шляхом технологічних змін, кг у.п./грн., кг н.е./грн, МДж/грн [21]; $E_{замj}^t$ – обсяги заміщення j -виду енергоресурсу у t -році, тис. т у.п., тис. т н.е., ГДж [21].

Енергоємність ВДВ i -секції економіки за базовий рік, визначається за формулою:

$$e_{ВДВij}^{\beta} = \frac{E_{ij}^{\beta}}{V_{ВДВi}^{\beta}}, \quad (6)$$

де

E_{ij}^{β} – обсяг споживання j -виду палива чи енергії i -секції економіки у базовому році; $V_{ВДВi}^{\beta}$ – обсяг ВДВ, створеного в i -секції економіки за базовий рік.

Зниження енергоємності ВДВ i -секції при s -структурі економіки для j -виду енергоресурсу ($\Delta e_{ВДВisj}^{\beta-t}$), визначається за формулою [12]:

$$\Delta e_{ВДВis}^{\beta-t} = \Delta e_{МСis}^{\beta-t} + \Delta e_{ВСis}^{\beta-t}, \quad (7)$$

Де $\Delta e_{МСis}^{\beta-t}$ – зниження/збільшення енергоємності ВДВ i -секції за рахунок міжсекційних змін (зміни частки секції у структурі ВВП); $\Delta e_{ВСis}^{\beta-t}$ – зниження енергоємності ВДВ i -секції за рахунок зміни її внутрішньої структури (внутрішньосекційні зміни).

Зміна енергоємності ВДВ i -секції за рахунок міжсекційних змін обчислюється за формулою:

$$\Delta e_{\text{мсіс}}^{\delta-t} = e_{\text{ВДВіс}}^{\delta} \Delta p_{\text{іс}}^{\delta-t} \quad (8)$$

Де $\Delta p_{\text{іс}}^{\delta-t}$ – зміна частки ВДВ i -го сектору у структурі ВВП країни відносно структури базового року за умови обмеження по структурі виробництва ВВП: $\sum_i p_{\text{іс}}^t = 1$, $p_{\text{іс}}^t$ – частка ВДВ i -го сектору економіки у структурі ВВП;

Зміна енергоємності ВДВ i -секції за рахунок внутрішньосекційних змін обчислюється за формулою:

$$\Delta e_{\text{всіс}}^{\delta-t} = \sum_q \Delta e_{\text{qіс}}^t = e_{\text{qіс}}^{\delta} \Delta r_{\text{qіс}}^{\delta-t}, \quad (9)$$

Де $\Delta r_{\text{qіс}}^{\delta-t}$ – зміна частки q -го розділу, що входить до складу i -секції за КВЕД відносно структури секції у базовому році; $e_{\text{qіс}}^{\delta}$ – енергоємність ВДВ q -го розділу, що входить до складу в i -секції за КВЕД у базовому році за умови обмеження по структурі ВДВ секції: $\sum_q r_{\text{qіс}}^t = 1$, $r_{\text{qіс}}^t$ – частка ВДВ q -го розділу у структурі ВДВ i -секції.

Для визначення прогнозного попиту на паливо та енергію для секції D у [22] запропоновано наступну формулу:

$$E_{Dj}^t = E_{\text{пер}j}^t + E_{\text{влс}j}^t, \quad (10)$$

Де $E_{\text{пер}j}^t$ – обсяги палива на перетворення в електричну та теплову енергію, що вироблена у секції D; $E_{\text{влс}j}^t$ – обсяги власного споживання палива секцією D на технологічні потреби.

Прогноз споживання палива на перетворення визначається так [14, 22]:

$$E_{\text{пер}j}^t = \sum_j (\sum_{i=1}^n B_{\text{wf}j}^t + \sum_{m=1}^n B_{\text{qm}j}^t + B_{\text{еін}j}^t) = k_{fj} W_f^t b_{wj}^t + k_{mj} Q_m^t b_{qj}^t + \sum k_{\text{ін}} B_{\text{ін}j}^t, \quad (11)$$

Де $B_{\text{wf}j}^t$ – витрати j -виду палива на електрогенерацію f -типу (f -тип електрогенерації, наприклад: ТЕС, ТЕЦ, ін. електрогенератори на органічному паливі) у прогнозованому році t ; $B_{\text{qm}j}^t$ – витрати j -виду палива на теплогенерацію m -типу (m -тип теплогенерації, наприклад: ТЕС, ТЕЦ, ін. теплогенератори на органічному паливі) у прогнозованому році t ; $B_{\text{еін}j}^t$ – інші потреби j -виду палива у секції D (газопостачання, постачання кондиційованого повітря); k_{fj} – частка електроенергії, що вироблена електрогенеруючими потужностями з використанням j -виду палива; W_f^t – обсяг електроенергії-брутто, виробленої електрогенеруючими потужностями f -типу у t -році [23, 24]; b_{wj}^t – питомі витрати j -виду палива на виробництво електроенергії в енергосистемі у t -році; k_{mj} – частка теплової енергії, що вироблена теплогенеруючими потужностями з використанням j -виду палива; Q_m^t – обсяг теплової енергії, виробленої теплогенеруючими потужностями m -типу у t -році [24]; b_{qj}^t – питомі витрати j -виду палива на виробництво теплової енергії в системі централізованого теплопостачання у t -році; $k_{\text{ін}j}$ – частка j -виду палива, що використана у секції D на інші потреби; $B_{\text{ін}j}^t$ – витрата органічного палива на інші потреби у секції D у t -році.

Витрати на власне споживання секцією D визначаються як різниця між обсягами споживання секцією всього та обсягами на перетворення. Розподіляються власні потреби енергоресурсу на виробництво електричної енергії, теплової енергії та розподілення газу і кондиційованого повітря. Прогноз цих витрат визначається за формулою [22]:

$$E_{\text{влс}j}^t = e_{\text{влс}j}^t \cdot V_{\text{ВДВД}}^t, \quad (12)$$

Де енергоємність власного виробництва секції D визначимо за формулою:

$$e_{\text{влс}j}^t = \frac{E_{Dj}^{\delta} - E_{\text{пер}j}^{\delta}}{V_{\text{ВДВД}}^{\delta}} - \Delta e_{\text{влс}j}^{\delta-t}, \quad (13)$$

Де E_{Dj}^{δ} – енергоспоживання j -виду палива секцією D у базовому році; $E_{\text{пер}j}^{\delta}$ – енергоспоживання j -виду палива секцією D у базовому році на перетворення в інші види енергії (електричну і теплову), обчислюється за формулою (11); $V_{\text{ВДВД}}^{\delta}$ – обсяг ВДВ секції D у базовому році; $\Delta e_{\text{влс}j}^{\delta-t}$ – зниження енергоємності технологічних потреб секції D відносно базового року.

Для прогнозування величини енергоємності технологічних потреб секції D необхідно знати зниження/перевитрати енергоємності власного споживання, які залежать від внутрішньої структури виробництва в секції: частки виробництва електричної енергії, теплової енергії, розподілення газу та кондиційованого повітря у ВДВ секції D на перспективні роки, тобто прогнозу структуру секції “Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря”. Вони потребують дослідження вказаних співвідношень, які можуть змінюватись, наприклад, при збільшенні постачання електричної енергії на потреби опалення та приготування їжі.

Частка зниження енергоємності власних технологічних потреб може бути розрахована так:

$$\Delta e_{\text{влс}j}^{\delta-t} = \frac{E_{Dj}^{\delta} - E_{\text{пер}j}^{\delta}}{V_{\text{ВДВД}}^{\delta}} \cdot \Delta r_{\text{qD}j}^{\delta-t},$$

Де позначення формули відповідають позначенням, використаним у формулах (10) - (13).

У процесі дослідження структури економіки країни виділяються наступні види структур: базова (фактична структура економіки в базовому році) та прогнозні. Останніх може бути декілька, обчислених за різними сценаріями: песимістичний (консервативний), базовий та оптимістичний. У приведених нижче розрахунках за базовий рік прийнято 2015 р., відповідна за базову взята структура економіки 2015 р. у фактичних цінах цього ж року. До песимістичної прогнозної структури відноситься структура, що розроблена на базі відповідного сценарію Енергетичної Стратегії України до 2030 р. редакції 2013 р. На подальший період до 2040 р. структура розрахована за тенденціями, що були закладені при розробці цієї Енергетичної Стратегії [19].

Оптимістичний сценарій структури економіки розраховувався за даними Стратегії розвитку промислового комплексу України на період до 2025 р., що розроблена Мінекономрозвитку України, з подовженням цих тенденцій до 2040 р. [20].

У розрахунках за методикою використано 2 структури економіки (I – базова (структура 2015 р.) та II – консервативна (за Енергетичною стратегією України до 2030 р. редакції 2013 р.)), які подовжено до 2040 р. за закладеними в них тенденціями, що наведені в [16]. Крім них, досліджувались: оптимістична структура (за Стратегією розвитку промислового комплексу України на період до 2025 р.), що зараз втратила актуальність [16, 20], та Енергетична стратегія України до 2035 р. Реалізація останньої також вимагає значних додаткових обсягів паливно-енергетичних ресурсів для компенсації зростання перевитрат ПЕР за прогнозних структурних змін, та побудову нових і модернізацію існуючих електростанцій [12]. Структура II на відміну від інших прогнозних, дає економію енергоресурсів і більш відповідає структурам економіки країн ЄС, в яких послуги (інші ВЕД) складають 60-80 % від ВВП. Обчислення здійснені за допомогою комп'ютерної програми «Попит», створеної у додатку Microsoft Access з використанням алгоритмічної мови Visual Basic for Application [16].

Обчислені на двох рівнях значення прогнозних потреб («Країна» та «Разом за ВЕД») уточнюються за допомогою векторного методу, описаного у [9, 14]. Узгоджений рівень прогнозного обсягу потреб в енергоресурсах обчислювався за допомогою програми «SPROS» [18].

Окремо визначається прогноз споживання палива та електроенергії для населення за залежністю:

$$P_{\text{нас}}^{t_d} = (b_{\text{нас}j}^6 - \Delta b_{\text{нас}j}^t) N^t \pm E_{\text{зам}j}^t, \quad (14)$$

Де $b_{\text{нас}j}^6$ – питомі витрати j -виду палива чи енергії, спожитих населенням у базовому році, на 1 особу; $\Delta b_{\text{нас}j}^t$ – зниження питомих витрат j -виду палива за умови впровадження енергозберігаючих заходів у домогосподарствах у році t ; N^t – прогнозна чисельність населення України згідно з даними Інституту демографії та соціальних досліджень НАН України [14]; $E_{\text{зам}j}^t$ – обсяги можливого заміщення j -виду палива чи енергії більш дешевими у домогосподарствах у прогнозованому році t [25].

Прогноз споживання теплової енергії для населення визначається за виразом [26, 27]:

$$Q_{\text{нас}}^t = Q_{\text{оп}}^t + Q_{\text{звн}}^t = \left(\sum q_{\text{оп}}^t \cdot F_{\text{оп}}^t + \sum q_{\text{звн}}^t \cdot n_n^t \right) \cdot K_n, \quad (15)$$

Де $q_{\text{оп}}^t$ і $q_{\text{гвп}}^t$ – відповідно річні питомі витрати теплової енергії на опалення житлового фонду та гаряче водопостачання населення країни за прогнозні роки, Гкал/м² і Гкал/особу (значення $q_{\text{оп}}^t$ і $q_{\text{гвп}}^t$ надано в [26]); $F_{\text{оп}}^t$ – загальна опалювальна площа житлового фонду країни за прогнозні роки, млн. кв. м; n_n^t – кількість населення країни за прогнозні роки, млн. осіб; K_n – коефіцієнт реального попиту на теплову енергію населенням.

Аналіз результатів дослідження. У табл. 1 – 5 наведено обчислені обсяги прогнозного попиту на енергоресурси за структурою базового 2015 р. та за прогнозовою (консервативною) структурою [12, 16].

Таблиця 1 – Прогноз попиту на електроенергію в Україні до 2040 р. з урахуванням структурного і технологічного енергозбереження та експорту, млрд кВт·год

Показники	2015	2020		2025	
	факт	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	82,2	94,6	91,7	113,7	110,3
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	82,2	94,7	92,2	113,7	106,8
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	82,2	94,6	91,9	113,7	108,9
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	36,5	38,1	38,1	37,6	37,6
Валове споживання електроенергії, нетто	118,7	132,7	130,0	151,2	146,5
Валове споживання електроенергії, брутто	150,5	167,1	163,7	189,0	183,1
Експорт	3,6	7,0	7,0	12,0	12,0
Всього попит	154,1	174,1	170,7	201,0	195,1

Продовження табл. 1

Показники	2030		2035		2040	
	I	II	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	137,2	124	163,7	146,8	183,2	165
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	137,2	125,8	163,7	148,7	183,2	166,5
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	137,2	124,7	163,7	147,6	183,2	165,6
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	36,5	36,5	36,7	36,7	37	37
Валове споживання електроенергії, нетто	173,7	161,2	200,4	184,3	220,2	202,7
Валове споживання електроенергії, бруто	215,3	199,8	246,4	226,6	268,6	247,3
Експорт	16	16	18	18	20	20
Всього попит	231,3	215,8	264,4	244,6	288,6	267,3

Таблиця 2 - Прогнозний попит на теплову енергію в Україні до 2040 року з урахуванням структурного і технологічного енергозбереження, тис. Гкал / ГДж

Показники	2015	2020		2025	
	факт	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	52,2	59,9	57,5	72,5	66,1
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	52,2	59,9	57,4	71,3	64,8
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	52,2	59,9	57,47	72,0	65,54
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	160,8	170	170	180,9	180,9
Валове споживання теплової енергії, нетто	213	229,9	227,5	252,9	246,4
Втрати в тепломережах	14,6	14,2	14,2	13,9	13,9
Всього попит	227,6	244,1	241,7	266,8	260,3

Продовження табл. 2

Показники	2030		2035		2040	
	I	II	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	88,5	77,7	105,3	91,2	116,3	100,5
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	85,4	74,6	100,4	86,2	110,6	94,8
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	87,1	76,4	103,1	89,1	113,9	98,1
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	181,5	181,5	197,2	197,2	208,6	208,6
Валове споживання теплової енергії, нетто	268,6	257,9	300,3	286,3	322,5	306,7
Втрати в тепломережах	13,8	13,8	13	13	11,2	11,2
Всього попит	282,4	271,7	313,3	299,3	333,7	317,9

Таблиця 3 – Прогноз попиту на природний газ в Україні до 2040 р. з урахуванням структурного і технологічного енергозбереження, млн м³

Показники	2015	2020		2025	
	факт	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	21,05	21,9	20,6	26,4	23,1
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	21,05	23,8	22,3	24,6	21,2
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	21,05	23,0	21,2	25,5	22,2
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	11,7	9,2	9,2	8,6	8,6
Всього попит	32,8	32,2	30,4	34,1	30,8

Продовження табл. 3

Показники	2030		2035		2040	
	I	II	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	32,2	26,6	38,3	30,8	43,3	34,4
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	26,8	21,3	30,2	22,5	33,5	24,5

Продовження табл. 3

Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	29,8	24,5	24,1	27,5	38,7	30,5
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	8	8	7,8	7,8	7,7	7,7
Всього попит	37,8	32,5	31,9	35,3	46,4	38,2

Таблиця 4 – Прогноз попиту на вугілля в Україні до 2040 р. з урахуванням структурного і технологічного енергозбереження, млн т вугілля

Показники	2015	2020		2025	
	факт	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	45,3	50,6	49,3	60,8	56,8
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	45,3	43,8	41,8	50,9	46,5
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	45,3	47,4	46,9	56,0	53,6
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	0,48	0,4	0,4	0,36	0,36
Всього попит	45,8	47,8	47,3	56,36	53,96

Продовження табл. 4

Показники	2030		2035		2040	
	I	II	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах	73,1	66,3	87,1	77,9	97,9	87,5
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	61,9	54,6	75,2	65,4	81,9	71
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	68,0	63,1	82,1	74,9	91,1	83,1
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	0,32	0,32	0,31	0,31	0,29	0,29
Всього попит	68,32	63,42	82,41	75,21	91,39	83,39

Таблиця 5 – Прогноз попиту на нафтопродукти в Україні до 2040 р. з урахуванням структурного і технологічного енергозбереження, млн т нафти*

Показники	2015	2020		2025	
	факт	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах*	10	11,5	11,7	13,9	14,5
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	10	11,4	11,7	13,6	14,4
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	10	11,45	11,7	13,8	14,46
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	3,14	2,96	2,96	2,81	2,81
Втрати при транспортуванні, зберіганні та розподіленні	0,5	0,47	0,47	0,44	0,44
Всього попит	13,66	14,88	15,13	17,05	17,75

Продовження табл. 5

Показники	2030		2035		2040	
	I	II	I	II	I	II
Споживання на рівні «Країна» (без населення) при структурних і технологічних змінах*	16,8	18,4	20	22,7	22,5	25
Споживання «Разом за ВЕД» для різних структур економіки і технологічних змінах	16,3	18,1	19,4	22,2	21,8	24,4
Узгоджений рівень споживання «Країна-ВЕД»	16,6	18,28	19,8	22,45	22,2	24,72
Споживання населення з технологічним енергозбереженням	2,67	2,67	2,65	2,65	2,62	2,62
Втрати при транспортуванні, зберіганні та розподіленні	0,41	0,41	0,38	0,38	0,35	0,35
Всього попит	19,68	21,38	22,83	25,53	25,17	27,67

* без урахування заміщення обсягів нафтопродуктів при заміні автомобілів на електромобілі, але з урахуванням перевитрат нафтового палива при збільшенні частки ВДВ секції сільського господарства та транспортної секції в економіці країни.

Висновки

Результатом робіт за напрямом прогнозування в ІЗЕ НАН України розвинуто комплексний метод прогнозування енергоспоживання з уточненням методичного підходу до визначення прогнозного попиту на основні види палива та енергії на двох ієрархічних рівнях, методики розрахунку потенціалу енергозбереження від структурних змін для всіх секцій економіки при врахуванні прогнозних структур електро- та теплогенеруючих потужностей, внутрішніх структур енергоємних секцій економіки [28], виокремлення населення в окрему групу споживачів, що додається до узгодженого розрахунку прогнозного попиту на енергоресурси.

Удосконалену методику визначення прогнозного попиту на різних ієрархічних рівнях економіки країни використано для обчислення прогнозних рівнів енергоспоживання за 2-ма сценаріями структур економіки з урахуванням оціненого технологічного потенціалу енергозбереження та прогнозних структур енергогенеруючих потужностей. Аналіз результатів розрахунків, виконаних за консервативною та базовою структурами розвитку економіки країни, свідчить про необхідність збільшення обсягів енергоресурсів, які необхідні для покриття попиту на них при реалізації програм розвитку економіки України, а при умовах прискореного розвитку вітчизняної промисловості, що закладені в Стратегії розвитку промислового комплексу України на період до 2025 р., обсяги будуть значно більшими.

Список використаної літератури

1. Кононов Ю.Д., Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. и др. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики. Н.И. Воропай, Ю.Д. Кононов (отв. ред.) Новосибирск, 2009. 177 с.
2. Пириашвили Б.З., Ворончук М.М., Галиновский Е.И. и др. Имитационное моделирование в энергетике. Б.М. Данилишин (под ред.). К.: Наук. думка, 2008. 303 с.
3. Лі Чао. Моделі прогнозування споживання електроенергії в КНР на довгострокову перспективу. Вісник Одеського національного університету. Економіка. 2016. Т. 21. Вип. 5(47). С. 26—32. URL: http://visnyk-onu.od.ua/journal/2016_21_5/06.pdf (дата звернення 10 січня 2019 р.).
4. Розен В.П., Демчик Я.М. Порівняльний аналіз методів прогнозування споживання електроенергії виробничих систем. Вісник Криворізького національного університету. Зб. наук. праць. 2016. Вип. 42. С. 41—47. URL: <http://visnykknknu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/11.pdf> (дата звернення 10 січня 2019 р.).
5. Черненко П.О., Мартинюк О.В. Середньострокове дворівневе прогнозування електричного споживання енергооб'єднання. Вісник Вінницького політехнічного інституту. ISSN 1997-9266. 2008. №6. С. 77—81.
6. Агеева Т.П. Методичні основи оцінки енергозбереження та прогнозування енергоспоживання в сфері житлового та комунально-побутового обслуговування населення України. Автореферат дис... канд. техн. наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. К.: Інститут загальної енергетики НАН України, 2002.
7. Касьянова Н.В., Левшова Ю.О. Комплексна модель оцінки енергоспоживання в регіоні. Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2014. № 2 (14E). С.164—171.
8. Кулик М.М., Сас Д.П. Детерміновано-стохастичне моделювання виробництва електроенергії в об'єднаних енергосистемах на довгострокову перспективу. Технічна електродинаміка. 2014. №5. С. 32—34.
9. Кулик М.М. Методи узгодження прогнозних рішень. Проблеми загальної енергетики. 2014. № 2 (37). С. 5—12.
10. Кулик М.М., Майстренко Н.Ю., Маляренко О.Є. Двоетапний метод прогнозування перспективного попиту на енергетичні ресурси. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2015. №5-6. С. 25—33.
11. Гнідий М.В. Методичний підхід до оцінки обсягів енергоспоживання для різних варіантів структури економіки. Проблеми загальної енергетики. 1999. № 1 (1). С. 52—57.
12. Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю. Прогнозування рівнів споживання паливно-енергетичних ресурсів з урахуванням потенціалу енергозбереження при структурних змінах в економіці. Проблеми загальної енергетики. 2015. №2 (41). С. 5—13. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.005>.
13. Маляренко О.Є., Євтухова Т.О., Майстренко Н.Ю. Прогнозування змін кінцевого споживання енергоресурсів з урахуванням структурних і технологічних зрушень в економіці країни. Проблеми загальної енергетики. 2013. № 4 (35). С. 33—40.
14. Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Спітковський А.І. Застосування методів комплексного прогнозування для визначення перспективного попиту на первинні енергетичні ресурси. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. № 1(48). С. 5—15. <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.005>.
15. Богославська О.Ю. Нові програмні засоби для прогнозування енергоспоживання з урахуванням структурних зрушень в економіці // Зб. мат. Міжн. наук.-техн. та навч.-метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'19». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 04-07 червня 2019 р. С. 53-54.
16. Майстренко Н.Ю., Богославська О.Ю. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання України при застосуванні різних прогнозних структур економіки. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. №2. С.

17. Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В. Удосконалений методичний підхід до визначення економічно доцільного потенціалу енергозбереження в енергоємних видах економічної діяльності. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. №3 (42). С. 23-30.

18. Спітківський А.І., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В. Використання програми «SPROS» для прогнозування попиту на енергетичні ресурси. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. №2 (49). С.5-13. <https://doi.org/10.15407/pge2017.02.005>.

19. Енергетична стратегія України до 2030 р., редакція 2013 р. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about/strategy_2030/ (дата звернення 10 січня 2019 р.).

20. Стратегія розвитку промислового комплексу України на період до 2025 року. URL: <http://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=10ef5b65-0209-4aa1-a724-49fd0877d8d6&title=ProektRozporiadzhenniaKabinetuMinistrivUkrainiproSkhvalenniaStrategiiRozvitkuPromislovogoKompleksuUkrainiNaPeriodDo2025-Roku>

21. Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В. Обґрунтування прогнозних обсягів потенціалу енергозбереження в укрупнених секторах економіки з урахуванням технологічних і структурних зрушень. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. № 4(47). С.58-67.

22. Маляренко О.Є., Станиціна В.В. Уточнення методики прогнозування попиту на паливо з оцінкою структурного потенціалу енергозбереження в енергетичному секторі. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. № 1(56). С. 19-23. <https://doi.org/10.15407/pge2019.01.019>.

23. Нечаєва Т.П. Методи та засоби прогнозування розвитку структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи з урахуванням екологічних вимог: дис. канд. техн. наук. Київ, 2015. 173 с.

24. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали) / Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. – 78 с.

25. Маляренко О.Є. Методичний підхід до визначення прогнозної структури споживання первинного палива. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. № 3 (46). С. 28—39. <https://doi.org/10.15407/pge2016.03.028>.

26. Посібник та доповнення до «Норм та вказівок по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні». КТМ 204 України 244-94. 2004. 84 с.

27. Куц Г.О., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В. Визначення прогнозного попиту на теплову енергію комплексним методом з урахуванням потенціалу енергозбереження. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. № 3 (54). С. 10—15. <https://doi.org/10.15407/pge2018.03.010>.

28. Майстренко Н.Ю. Прогнозування рівнів споживання ПЕР у переробній промисловості з урахуванням загального структурного потенціалу енергозбереження. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. № 1 (52). С. 32—40. <https://doi.org/10.15407/pge2018.01.032>.

O. Malyarenko, Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, **ORCID** 0000-0001-5882-916X

N. Maistrenko, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0002-1757-1665

V. Stanytsina, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0002-1005-6185

O. Bogoslavskaya, Cand. Sc. (Economy), **ORCID** 0000-0002-4286-7505

Institute Of General Energy

The National Academy Of Sciences Of Ukraine

IMPROVED COMPLEX METHOD OF FORECASTING ENERGY CONSUMPTION ON A LONG-TERM PERSPECTIVE

The article provides a developed integrated method for forecasting energy consumption, which includes an advanced methodology for predicting energy consumption by a normative method and a method for coordinating predictive solutions by a vector method. According to the improved method, the normative method performs the forecast calculations on the TOP ("Country") and DOWN-levels in terms of the energy. The scenario-based approach examines the impact of changes in the structure of the Ukrainian economy at the level of fuel and energy consumption in the two proposed variants of economic structures. To determine the forecasted demand for energy for the population, a separate methodology has been developed that has features for different types of energy resources. The forecast of electricity and fuel consumption for the population was determined by the specific consumption of fuel and electricity per capita in the base year, demographic forecast and the amount of technological energy saving. For the thermal energy demand for the population consists of the demand for hot water supply, which is annual, and demand for heating of residential premises, which is seasonal. The latter value is determined through the norms for heating residential areas, the forecast of housing development, the potential of technological energy savings due to insulation of existing buildings, reducing the demand for thermal energy for

new energy-efficient buildings. Using the vector method, the agreed forecasts for the consumption of electric, thermal energy, coal, natural gas, petroleum products (without population) were made, with the subsequent addition of the population's demand for fuel and energy and the estimation of the forecast demand for energy resources by 2040.

Keywords: demand, energy resources, forecasting, method, structure, energy saving potential.

References

1. Kononov Yu.D., Gal'perova E.V., Kononov D.Yu. i dr. (2009) *Metody i modeli prognoznykh issledovaniy vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki* [Methods and models of predictive studies of the relationship of energy and economics.] N.I. Voropay, Yu.D. Kononov (otv. red.) Novosibirsk, 177 pp. (in Russian)
2. Piriashvili B.Z., Voronchuk M.M., Galinovskiy E.I. i dr. (2008) *Imitatsionnoe modelirovanie v energetike* [Simulation in the energy sector.] B.M. Danilishin (pod red.). Kiyv: Nauk. dumka, 303 pp. (in Russian)
3. Li Chao (2016). Modeli prohnozuvannya spozhyvannya elektroenerhii v KNR na dovhostrokovu perspektyvu [Models of forecasting of electricity consumption in the PRC for the long-term perspective] *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Ekonomika*. [Bulletin of the Odessa national university. Economics] Vol. 21, no. 5(47), pp. 26—32. Available at: http://visnyk-onu.od.ua/journal/2016_21_5/06.pdf (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)
4. Rozen V.P., Demchuk Ya.M. (2016). Porivnialnyi analiz metodiv prohnozuvannya spozhyvannya elektroenerhii vyrobnychkykh system [Comparative analysis of methods for forecasting electricity consumption of industrial systems]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu* [Bulletin of the Kryviy Rih national university] Vol. 42, pp. 41—47. Available at: <http://visnykkn.com.ua/wp-content/uploads/file/42/11.pdf> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)
5. Chernenko P.O., Martyniuk O.V. (2008) Serednostrokovye dvorivneve prohnozuvannya elektrychnoho spozhyvannya enerhoobiednannya [Medium-term two-level forecasting of electric energy consumption]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu* [Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute] No.6, pp. 77—81. (in Ukrainian)
6. Aheieva T.P. (2002) *Metodychni osnovy otsinky enerhozberezhennia ta prohnozuvannya enerhospozhyvannia v sferi zhytlovoho ta komunalno-pobutovoho obsluhovuvannia naseleння Ukrainy* [Methodical bases of estimation of energy saving and forecasting of energy consumption in the sphere of residential and communal services of the population of Ukraine] (PhD Thesis). Kiyv: Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. (in Ukrainian)
7. Kasianova N.V., Levshova Yu.O. (2014) Kompleksna model otsinky enerhospozhyvannia v rehioni [Comprehensive model of energy consumption in the region]. *Nauchnyy vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitel'noy akademii* [Scientific bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy]. No. 2 (14E), pp.164—171. (in Ukrainian)
8. Kulyk M.M., Sas D.P. (2014) Determinovano-stokhastychno modeliuвання vyrobnytstva elektroenerhii v obiednanykh enerhosystemakh na dovhostrokovu perspektyvu [Deterministic-stochastic modeling of electricity generation in combined power systems for the long-term perspective]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics]. No.5, pp. 32—34. (in Ukrainian)
9. Kulyk M.M. (2014) Metody uzghodzhennia prognoznykh rishen [Methods of coordinating forecast decisions]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol. 2 (37), pp. 5—12. (in Ukrainian)
10. Kulyk M.M., Maistrenko N.Yu., Maliarenko O.Ye. (2015) Dvoetapnyi metod prohnozuvannya perspektyvnoho popytu na enerhetychni resursy [A two-stage method for forecasting the future demand for energy resources]. *Energotekhnologii i resursoberezhennia* [Energy technologies and resource saving] No. 5-6, pp. 25—33. (in Ukrainian)
11. Hnidy M.V. (1999) Metodychnyi pidkhid do otsinky obsiahiv enerhospozhyvannia dlia riznykh variantiv struktury ekonomiky [Methodical approach to estimation of volumes of energy consumption for various variants of the structure of the economy]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol. 1 (1), pp. 52—57. (in Ukrainian)
12. Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu. (2015) Prohnozuvannya rivniv spozhyvannia palyvno-enerhetychnykh resursiv z urakhuvanniam potentsialu enerhozberezhennia pry strukturnykh zminakh v ekonomitsi [Forecasting of consumption levels of fuel and energy resources taking into account the potential of energy saving in case of structural changes in the economy]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.2 (41), pp. 5—13. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.005> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)
13. Maliarenko O.Ye., Yevtukhova T.O., Maistrenko N.Yu. (2013) Prohnozuvannya zmin kintsevoho spozhyvannia enerhoresursiv z urakhuvanniam strukturnykh i tekhnolohichnykh zrushen v ekonomitsi krainy [Forecast of changes in final energy consumption taking into account structural and technological changes in the national economy]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol. 4 (35), pp. 33—40. (in Ukrainian)
14. Kulyk M.M., Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu., Stanytsina V.V., Spitkovskiy A.I. (2017) Zastosuvannya metodiv kompleksnoho prohnozuvannia dlia vyznachennia perspektyvnoho popytu na pervynni

enerhetychni resursy [The application of integrated forecasting methods to determine the promising demand for primary energy resources]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol. 1(48), pp. 5—15. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.005> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

15. Bohoslavsk O.Yu. (2019) Novi programni zasoby dlia prohnozuvannia enerhospozhyvannia z urakhuvanniam strukturykh zrushen v ekonomitsi [New software for forecasting energy consumption taking into account structural changes in the economy]. Proceedings of the «*Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku – PEMS19*» (Ukraine, Kyiv, June 04-07, 2019) Kiyv: KPI them Igor Sikorsky, pp. 53-54. (in Ukrainian)

16. Maistrenko N.Yu., Bohoslavsk O.Yu. (2019) Osoblyvosti prohnozuvannia rivniv enerhospozhyvannia Ukrainy pry zastosuvanni riznykh prohnoznykh struktur ekonomiky [Features of forecasting of energy consumption levels of Ukraine in application of various forecasting structures of the economy]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.2 (57), pp. 21-26. (in Ukrainian)

17. Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu., Stanytsina V.V. (2015) Udoskonaleny metodychnyi pidkhd do vyznachennia ekonomichno dotsilnoho potentsialu enerhozberezhennia v enerhoiemnykh vydakh ekonomichnoi diialnosti [Improved methodical approach to determining the economically viable energy saving potential in energy intensive economic activities]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.3 (42), pp. 23-30. (in Ukrainian)

18. Spitkovskiy A.I., Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu., Stanytsina V.V. (2017) Vykorystannia prohramy «SPROS» dlia prohnozuvannia popytu na enerhetychni resursy [Use of the "SPROS" program to predict demand for energy resources]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy] Vol.2 (49), pp.5-13. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2017.02.005> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

19. *Enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2030 r., redaktsiia 2013 r.* (2013) [Energy Strategy of Ukraine till 2030, edition 2013] Available at: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about/strategy_2030 (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

20. *Stratehiia rozvytku promyslovoho kompleksu Ukrainy na period do 2025 roku.* [Strategy of development of the industrial complex of Ukraine for the period till 2025]. Available at: <http://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=10ef5b65-0209-4aa1-a724-49fd0877d8d6&title=ProektRozporiadzhenniaKabinetuMinistrivUkrainiproSkhvalenniaStrategiiRozvitkuPromislovoGoKompleksuUkrainiNaPeriodDo2025-Roku> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

21. Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu., Stanytsina V.V. (2016) Obgruntuvannia prohnoznykh obsiahiv potentsialu enerhozberezhennia v ukрупnenykh sektorakh ekonomiky z urakhuvanniam tekhnolohichnykh i strukturykh zrushen [Justification of the projected volumes of energy saving potential in the enlarged sectors of the economy, taking into account technological and structural developments]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.4 (47), pp.58-67. (in Ukrainian)

22. Maliarenko O.Ye., Stanytsina V.V. (2019) Utochnennia metodyky prohnozuvannia popytu na palyvo z otsinkoiu strukturnoho potentsialu enerhozberezhennia v enerhetychnomu sektori [Clarification of the methodology for forecasting demand for fuel with an assessment of the structural potential of energy saving in the energy sector]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.1 (56), pp. 19-23. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2019.01.019> (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

23. Nechaieva T.P. (2015) *Metody ta zasoby prohnozuvannia rozvytku struktury heneruiuchykh potuzhnosti elektroenerhetychnoi systemy z urakhuvanniam ekolohichnykh vymoh* [Methods and means of forecasting the development of the structure of generating capacities of the power system taking into account environmental requirements] (PhD Thesis). Kiyv, Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. (in Ukrainian)

24. Kulyk M.M., Horbulin V.P., Kyrylenko O.V. (2017) *Kontseptualni pidkhody do rozvytku enerhetyky Ukrainy (analychni materialy)* [Conceptual approaches to energy development in Ukraine (analytical materials)]. Kiyv, Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. (in Ukrainian)

25. Maliarenko O.Ye. (2016) *Metodychnyi pidkhd do vyznachennia prohnoznoi struktury spozhyvannia pervynnoho palyva* [Methodical approach to determining the predicted structure of primary fuel consumption]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.3 (46), pp. 28—39. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2016.03.028>. (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

26. KTM 204 Ukraine 244-94 (2004) *Posibnyk ta dopovnnennia do «Norm ta vkazivok po normuvanni vytrat palyva ta teplovoi enerhii na opalennia zhytlovykh ta hromadskykh sporud, a takozh na hospodarsko-pobutovi potreby v Ukraini»* [The manual and supplements to the "Norms and instructions on the standardization of fuel and heat energy expenditures for heating of residential and public buildings, as well as for household and household needs in Ukraine"]. Ukraine, Kiyv, pp. 84. (in Ukrainian)

27. Kuts H.O., Maliarenko O.Ye., Maistrenko N.Yu., Stanytsina V.V. (2018) *Vyznachennia prohnoznoho popytu na teplovu enerhiu kompleksnym metodom z urakhuvanniam potentsialu enerhozberezhennia* [Determination of the forecasted demand for thermal energy by a complex method taking into account the potential of energy saving]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol. 3(54), pp. 10—15. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2018.03.010>. (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

28. Maistrenko N.Yu. (2018) Prohnozuvannia rivniv spozhyvannia PER u pererobnii promyslovosti z urakhuvanniam zahalnoho strukturnoho potentsialu enerhozberzhennia [Forecasting of consumption levels of FER in the processing industry taking into account the overall structural potential of energy saving]. *Problemy zahalnoi enerhetyky* [Problems of general energy]. Vol.1(52), pp. 32—40. Available at: <https://doi.org/10.15407/pge2018.01.032>. (accessed 10 January 2019). (in Ukrainian)

Надійшла 12.11.2019
Received 12.11.2019

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.577 + 697

М.К. Безродний, д-р техн. наук, проф, ORCID 0000-0002-3500-5165

Н.О. Притула, к-т техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-3500-5165

І.Ю. Опанасюк, студентка, ORCID 0000-0002-3817-8045

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

КОМБІНОВАНА ТЕПЛОНАСОСНА СИСТЕМА ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ З РЕКУПЕРАТОРОМ ТЕПЛОТИ ТА ЧАСТКОВОЮ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ПОВІТРЯ

На сьогоднішній день спостерігається великий попит на відновлювальні джерела енергії, оскільки невпинно відбувається підвищення вартості природніх енергоресурсів та збільшення санкції на установки, які мають шкідливий вплив на навколишнє середовище. Все більше підприємств в Україні переходять на більш сучасні технології для забезпечення потреб споживачів. Таким чином з кожним днем в Україні збільшується попит на використання теплових насосів як альтернативних джерел тепlopостачання. Однією з найбільш перспективних сфер застосування теплових насосів є системи вентиляції та повітряного опалення будівель з великими об'ємами приміщень. Підвищення енергетичної ефективності таких систем може бути досягнуто шляхом комбінації теплових насосів з різними методами утилізації відпрацьованої теплоти. В зв'язку з цим розглянута комбінована система повітряного опалення і вентиляції з рекуператором-утилізатором теплоти та частковою рециркуляцією відпрацьованого вентиляційного повітря. Метою даного дослідження є термодинамічний аналіз системи та визначення характеру впливу зовнішніх умов, типу будівлі і параметрів теплоутилізаційних пристроїв на енергетичну ефективність системи тепlopостачання.

В статті проведено термодинамічний та числовий аналіз комбінованої теплонасосної системи повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря з врахуванням параметрів зовнішнього повітря та типу будівлі. Визначено, що не зважаючи на пониження енергетичної ефективності теплонасосної системи повітряного опалення і вентиляції з утилізацією відпрацьованого вентиляційного повітря зі збільшенням відносних витрат теплоти на опалення в порівнянні з витратами теплоти на вентиляцію, питомі затрати зовнішньої енергії на одиницю продукуюваної теплоти на вході в приміщення залишаються на надзвичайно низькому рівні навіть при низьких температурах зовнішнього атмосферного повітря. В зв'язку з цим розглянута комбінована теплонасосна система може бути рекомендована як альтернативна система тепlopостачання великих об'єктів.

Ключові слова: теплонасосна система опалення та вентиляції; повітряний тепловий насос; рекуператор; рециркуляція відпрацьованого повітря.

Вступ

Серед великої різноманітності систем тепlopостачання особливе місце посідають системи повітряного опалення і вентиляції. На даний час такі системи набувають все більш широкого застосування в зв'язку з поширенням об'єктів тепlopостачання з великими об'ємами приміщень (торгівельні і торгівельно-розважальні центри, нові промислові та спортивні споруди, тощо).

Відомо, що перспективним напрямком підвищення енергетичної ефективності таких систем є застосування в них теплових насосів (ТН) [1-3]. Висока енергетична ефективність використання теплових насосів в системах повітряного опалення і вентиляції промислових, громадських та житлових приміщень досягається при малій різниці температур припливного та відпрацьованого повітря при помірних температурах навколишнього повітря. Взимку, коли температура зовнішнього повітря досить низька,

© М.К. Безродний, Н.О. Притула, І.Ю. Опанасюк, 2019

експлуатація простих повітряних теплонасосних систем (ТНС) недоцільна, оскільки при низьких температурах зовнішнього повітря спостерігається суттєве зменшення їх ефективності, що обумовлює застосування більш складних, зокрема теплонасосно-рекуператорних схем [4] з утилізацією теплоти відпрацьованого вентиляційного повітря. В цьому випадку вентиляційні викиди, навіть при високих коефіцієнтах рекуперації, мають значно вищу температуру, ніж температура навколишнього атмосферного повітря, що свідчить про доцільність використання теплоти вентиляційних викидів в випарнику ТН для догрівання свіжого повітря до необхідного рівня на вході у приміщення [5]. Економію вартості установки можна досягти також за допомогою часткової рециркуляції відпрацьованого повітря. Оскільки повітря, що видаляється з приміщення, має температуру вище, ніж температура навколишнього середовища, то у випадку відсутності шкідливих речовин частина його у зимовий період може не викидатись назовні, а після очищення підмішуватись до припливного повітря для його підігріву і подаватись у приміщення.

Загально відомо [6-7], що застосування теплонасосно-рекуператорних схем в таких системах теплопостачання є одним з найбільш ефективних напрямків використання теплових насосів. Разом з тим в літературних джерелах бракує детального термодинамічного аналізу умов найбільш ефективної роботи подібних систем.

Термодинамічний аналіз ефективності теплонасосно-рекуператорної схеми повітряного опалення і вентиляції з частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря був виконаний у роботі [8] за умов заданої різниці температур припливного і відпрацьованого повітря. Проведений аналіз дозволив встановити межі ефективного використання окремих способів утилізації теплоти відпрацьованого повітря, а саме рециркуляції і рекуперації. Разом з тим, становить інтерес ефективність роботи подібної схеми за різних температурних умов подачі припливного повітря, що враховують особливості об'єкта теплопостачання.

В зв'язку з цим в межах даної статті проведено аналіз енергетичної ефективності вищезазначеної схеми з урахуванням особливостей об'єкта теплопостачання, типу будівлі, кратності повітрообміну, що визначають співвідношення витрат теплоти на опалення і вентиляцію і відповідно, підігрів припливного повітря.

Постановка задачі

Метою даної статті є: аналіз ефективності комбінованої повітряної теплонасосної системи повітряного опалення та вентиляції з рециркуляцією та рекуператором теплоти при розміщенні камери змішування перед конденсатором теплового насоса; визначення характеру впливу на теплонасосну систему типу будівлі і параметрів теплоутилізаційних пристроїв відпрацьованого повітря.

Опис теплонасосної схеми повітряного опалення та вентиляції

В роботі [9] розглянуто ТНС повітряного опалення та вентиляції з використанням рекуператора теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря з камерою змішування (КЗ), встановленою безпосередньо перед конденсатором ТН (рис.1).

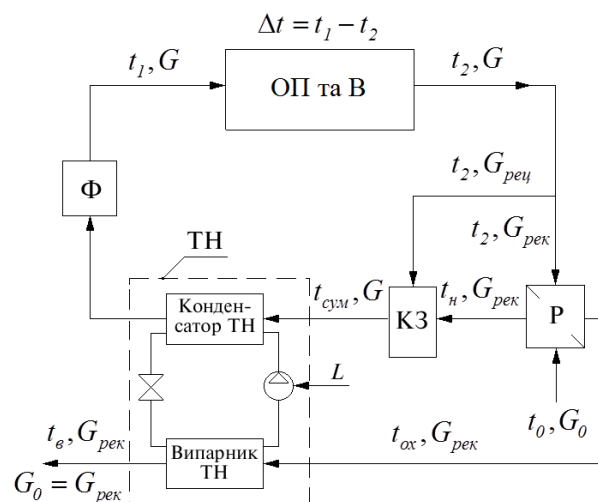


Рис. 1. Схема з частковою рециркуляцією та розміщенням камери змішування перед конденсатором ТН: ОП та В – об'єкт опалення та вентиляції; ТН – тепловий насос; Р – рекуператор; Ф – фільтр; КЗ – камера змішування

В даній схемі відбувається утилізація відпрацьованого вентиляційного повітря двома шляхами: шляхом часткової рециркуляції і рекуперації в теплообміннику-утилізаторі. Із рис. 1 видно, що основний потік відпрацьованого вентиляційного повітря з параметрами t_2, G після об'єкту опалення та вентиляції розділяється на два потоки. Перший потік з масовою витратою $G_{рек}$ проходить через рекуператор-утилізатор, у якому охолоджується до температури $t_{ок}$, і направляєється в випарник ТН, де охолоджується до температури $t_в$ і скидається в навколишнє середовище. Другий потік з масовою витратою $G_{рец}$ направляєється до камери змішування, де відбувається змішування з попередньо підігрітим в рекуператорі до температури $t_н$ свіжим повітрям. Отримана суміш подається в конденсатор ТН, підігрівається до температури t_1 і після очищення в фільтрі направляєється на вхід в приміщення.

Аналітичний аналіз системи

В попередній статті [8] відповідний аналіз проведено за умов заданої різниці температур припливного і відпрацьованого повітря $\Delta t = t_1 - t_2 = \text{const}$. Цілком очевидно, що ця різниця температур повинна враховувати особливості об'єкта теплопостачання і може бути представлена в пропорційній залежності відносно різниці температур в приміщенні і атмосферного повітря, тобто у вигляді співвідношення

$$\Delta t = K(t_н - t_0), \quad (1)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Фізична суть коефіцієнта пропорційності K впливає із співставлення співвідношень для витрат теплоти на опалення і вентиляцію, тобто із рівнянь

$$Q_{оп} = G_{п.с.р} \Delta t = G_{п.с.р} K(t_н - t_0), \quad (2)$$

$$Q_{вент} = G_{п.с.р}(t_н - t_0), \quad (3)$$

звідки маємо

$$K = \frac{Q_{оп}}{Q_{вент}}. \quad (4)$$

Таким чином, коефіцієнт пропорційності K являє собою відношення витрат теплоти на опалення і вентиляцію.

З іншого боку витрати теплоти на опалення можна представити як втрати теплоти через огорожуючі конструкції приміщення

$$Q_{оп} = F_{огор} \bar{k}(t_н - t_0), \quad (5)$$

де \bar{k} – середній коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/\text{М}^2$; $F_{огор}$ – загальна площа поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій приміщення, М^2 ,

а витрати теплоти на вентиляцію – з урахуванням необхідної масової витрати повітря, виходячи з об'єму приміщення і необхідної кратності повітрообміну

$$Q_{вент} = \frac{\rho_{п.с.р} K_{п.об} V_{прим} (t_н - t_0)}{3600}. \quad (6)$$

Тоді, з урахуванням формул (5) і (6) вираз (7) для коефіцієнта пропорційності приймає вигляд

$$K = \frac{Q_{оп}}{Q_{вент}} = X \frac{1}{K_{п.об}}, \quad (7)$$

де X – характеристика приміщення

$$X = \frac{3600 \bar{k} F_{огор}}{\rho_{п.с.р} V_{прим}}. \quad (8)$$

Таким чином, для заданої характеристики приміщення коефіцієнт пропорційності K буде визначатись тільки кратністю повітрообміну. Знаючи ці величини (X і $K_{п.об}$), можна визначити за формулою (7) коефіцієнт K і прийняти його як вихідну величину для подальшого термодинамічного аналізу схеми. Тоді,

температура повітря на вході до приміщення t_1 може бути представлена як:

$$t_1 = t_2 + \Delta t, \quad (9)$$

де Δt – перепад температур повітря, на вході та виході з приміщення, $^{\circ}\text{C}$, що визначається за рівнянням (1).

Для проведення аналізу ефективності теплонасосної схеми треба визначити термодинамічний стан системи, що в свою чергу визначається параметрами повітря в її вузлових точках. При цьому масові витрати

окремих потоків повітря можна оцінити за допомогою коефіцієнта рециркуляції, що може прийнятий як відношення

$$K_{\text{рец}} = \frac{G_{\text{рец}}}{G} \quad (10)$$

Тоді, масові витрати потоків рециркуляції і рекуператії можуть бути визначені як

$$G_{\text{рец}} = K_{\text{рец}} G, \quad (11)$$

$$G_{\text{рек}} = G(1 - K_{\text{рец}}). \quad (12)$$

Визначення інших параметрів повітря може бути виконано на основі теплових балансів окремих елементів схеми. При цьому, якщо ефективність рекуператора охарактеризувати коефіцієнтом рекуператії

$$\eta_p = \frac{t_2 - t_{\text{ох}}}{t_2 - t_0}, \quad (13)$$

то на підставі (13) та теплового балансу рекуператора можна отримати рівняння для визначення шуканих температур нагрітого свіжого повітря t_n та охолодженого відпрацьованого повітря $t_{\text{ох}}$ на виході із рекуператора

$$t_n = t_2 - (1 - \eta_p)(t_2 - t_0), \quad (14)$$

$$t_{\text{ох}} = t_2 - \eta_p(t_2 - t_0), \quad (15)$$

де t_2 – температура повітря на виході з приміщення, °C; t_0 – температура навколишнього атмосферного повітря, °C.

Температура t_b відпрацьованого повітря на виході з випарника ТН може бути визначена із теплового балансу ТН

$$Q_{\text{вип}} + L = Q_k \quad (16)$$

де $Q_{\text{вип}}$ - тепловий потік у випарнику ТН, L - потужність приводу компресора, Q_k – тепловий потік, відведений від конденсатора ТН.

Визначаючи складові рівняння (16) за формулами

$$Q_{\text{вип}} = (1 - K_{\text{рец}})Gc_n(t_{\text{ох}} - t_b), \quad (17)$$

$$L = \frac{Q_{\text{вип}}}{\varphi - 1}, \quad (18)$$

$$Q_k = Gc_n(t_n - t_{\text{сум}}), \quad (19)$$

рівняння (16) може бути приведенне до вигляду

$$(1 - K_{\text{рец}})Gc_p(t_{\text{ох}} - t_b) \frac{\varphi}{\varphi - 1} = Gc_p(t_n - t_{\text{сум}}), \quad (20)$$

звідки впливає вираз для визначення температури відпрацьованого повітря на виході з випарника ТН

$$t_b = t_{\text{ох}} - \left[\frac{t_n - t_{\text{сум}} \varphi - 1}{1 - K_{\text{рец}} \varphi} \right]. \quad (21)$$

Температура $t_{\text{сум}}$ суміші повітря на виході з КЗ визначається на основі теплового балансу

$$G_{\text{рец}}c_p t_2 + G_{\text{рек}}c_p t_n = Gc_p t_{\text{сум}}, \quad (22)$$

звідки маємо

$$t_{\text{сум}} = K_{\text{рец}} t_2 + (1 - K_{\text{рец}}) t_n. \quad (23)$$

В загальному випадку коефіцієнт трансформації теплоти реального теплового насоса можна представити як

$$\varphi = \varphi_T \eta_{\text{ТН}}, \quad (24)$$

де $\eta_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт втрат або ККД ТН; φ_T – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

Теоретичний коефіцієнт трансформації теплоти ідеального циклу Карно Φ_T з урахуванням теплових необоротностей у випарнику та конденсаторі теплового насоса визначається за співвідношенням

$$\Phi_T = \frac{1}{1 - \frac{T_b^{TH}}{T_k^{TH}}} = \frac{1}{1 - \frac{273 + t_b - \Delta t_b}{273 + t_1 + \Delta t_k}}, \quad (25)$$

де T_b^{TH} – абсолютна температура випаровування холодильного агента у випарнику ТН, К; T_k^{TH} – абсолютна температура конденсації холодильного агента в конденсаторі ТН, К; t_b – температура відпрацьованого повітря на виході з випарника ТН, °С; t_1 – температура повітря на виході з конденсатора ТН, °С; Δt_b – температурний перепад між потоками відпрацьованого повітря й холодильного агента на виході з випарника теплового насоса, °С; Δt_k – температурний перепад між потоками холодильного агента й повітря на виході з конденсатора ТН, °С. У літературі наводяться числові значення температурних перепадів у випарнику і конденсаторі для теплових насосів типу «повітря–повітря». Згідно з [10] для конденсатора ТН можна прийняти $\Delta t_k = 10$ °С, для випарника – $\Delta t_b = 10$ °С.

Знаючи параметри повітря в вузлових точках енергетичну ефективність ТНС, зображеної на рис. 1, можна охарактеризувати коефіцієнтом використання зовнішньої енергії на привід ТН по відношенню до одиниці виробленої теплоти для задоволення потреб повітряного опалення та вентиляції

$$l_{оп+вент} = \frac{L}{Q_{оп+вент}}, \quad (26)$$

$Q_{оп+вент}$ – тепловий потік, підведений до приміщення для задоволення потреб опалення та вентиляції, кВт.

Визначаючи потужність приводу компресора теплового насоса за рівнянням (18), а величину $Q_{оп+вент}$ за рівнянням

$$Q_{оп+вент} = Q_{оп} + Q_{вент} = Gc_p(t_n - t_0)(K + 1), \quad (27)$$

із (26) отримуємо вираз для коефіцієнта використання зовнішньої енергії на ТНС повітряного опалення та вентиляції з використанням рекуператора теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря:

$$l_{оп+вент} = \frac{(1 - K_{рец})(t_{ок} - t_b)}{(\varphi - 1)(t_n - t_0)(K + 1)}. \quad (28)$$

Розрахунковий аналіз системи

Метою розрахункового аналізу в межах даної статті є визначення впливу особливостей об'єкта теплопостачання на енергетичну ефективність теплонасосної системи теплопостачання з утилізацією теплоти відпрацьованого вентиляційного повітря. Ці особливості включають в себе тип будівлі, її геометричні характеристики, теплоізоляційні характеристики огорожуючих конструкцій, призначення будівлі, що визначає величину нормативної кратності повітрообміну. Але всі ці характеристик мають комплексний вплив на режим роботи системи теплопостачання через вищезазначений коефіцієнт K , що являє собою відношення витрат теплоти на опалення та на вентиляцію. В свою чергу цей коефіцієнт залежить від комплексної характеристики будівлі X і кратності повітрообміну $K_{п.об}$. Аналіз розрахункових і нормативних значень цих величин приводить до висновку, що величина X змінюється в вузькому діапазоні від 0,5 до 1,0, а кратність повітрообміну $K_{п.об}$ може сягати величин від 2 до 10 і навіть більше. Разом з тим, їх відношення, що визначає величину коефіцієнта K , тобто відношення витрат теплоти на опалення і вентиляцію змінюється в досить вузькому діапазоні і для більшості випадків не виходить за межі від $K = 0,1$ до $K = 0,3$. Тому нижченаведений розрахунковий аналіз був проведений в цьому діапазоні зміни величини K .

Інші значення вихідних параметрів, які впливають на енергетичну ефективність вищенаведеної теплонасосної системи опалення та вентиляції, були прийняті з урахуванням результатів аналізу в роботі [9]. При цьому було встановлено, що застосування рециркуляції відпрацьованого повітря має позитивний вплив на енергетичну ефективність роботи системи тільки до значень коефіцієнта рециркуляції $K_{рец} = 0,5$. На відміну від цього характеристика рекуператора η_p позитивно впливає у всьому діапазоні її зміни. Тому для даного аналізу було прийняте максимальне реальне значення коефіцієнта рекуперації на рівні $\eta_p = 0,6$.

Вищенаведена система взаємопов'язаних рівнянь, що визначають температуру повітря в вузлових точках схеми, разом з рівняннями (24), (25) для коефіцієнта трансформації ТН була вирішена методом послідовних наближень при різних температурах зовнішнього атмосферного повітря і температурі

всередині приміщення $t_{п} = 20$ °С. Було також прийнято, що температура повітря на виході дорівнює температурі повітря в приміщенні $t_2 = t_{п}$.

Результати розрахунків найбільш характерної температури на виході з випарника ТН, що визначає умови роботи ТН, в залежності від температури зовнішнього повітря наведені на Рис. 2.

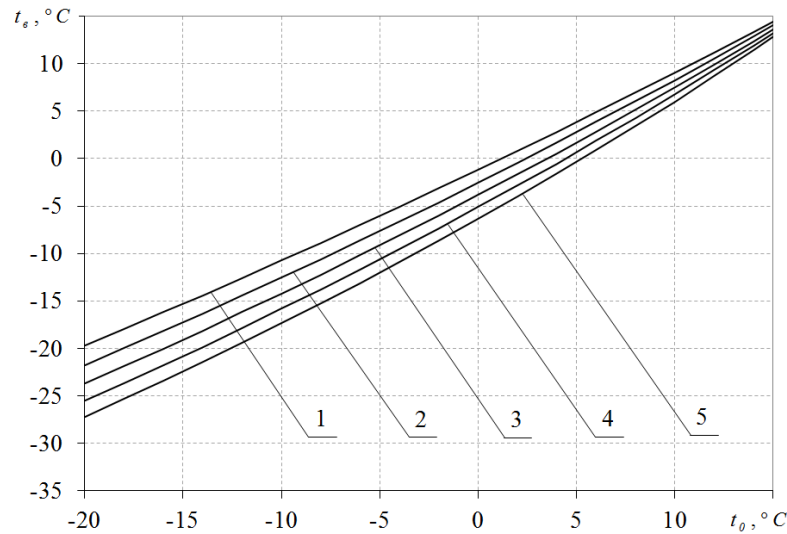


Рис. 2. Залежність температури повітря на виході із випарника ТН від температури навколишнього повітря при значеннях $\eta_p = 0,6$, $K_{\text{рец}} = 0,5$, $\eta_{\text{тн}} = 0,6$: 1 – $K = 0,1$; 2 – $0,15$; 3 – $0,2$; 4 – $0,25$; 5 – $0,3$

Із рисунка видно, що зі збільшенням величини коефіцієнта K , тобто зі збільшенням витрат теплоти на опалення відносно витрат на вентиляцію, температура повітря на виході з випарника ТН зменшується, що приводить до погіршення умов роботи ТН. Відповідно до цього зменшуються значення коефіцієнта трансформації ТН, залежності для яких наведені на Рис. 3.

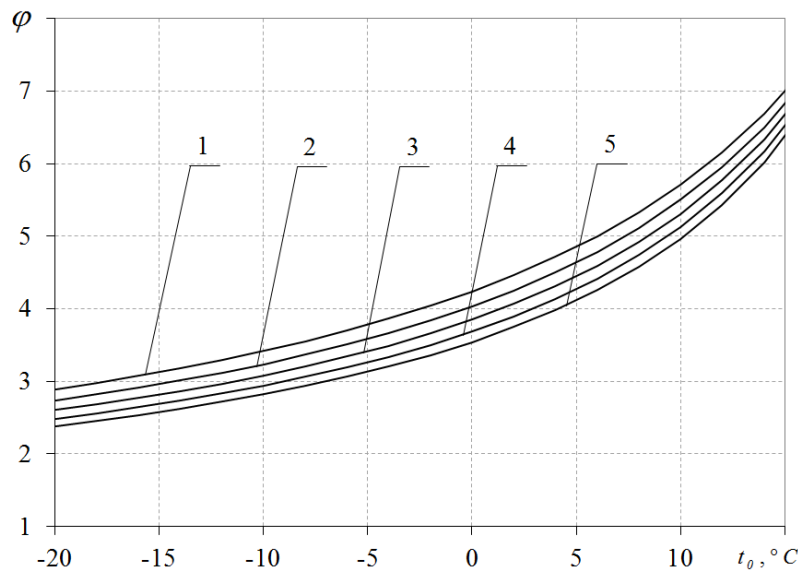


Рис. 3. Залежність коефіцієнта трансформації ТН від температури зовнішнього повітря при $\eta_p = 0,6$, $K_{\text{рец}} = 0,5$, $\eta_{\text{тн}} = 0,6$: 1 – $K = 0,1$; 2 – $0,15$; 3 – $0,2$; 4 – $0,25$; 5 – $0,3$

Отримані результати розрахунків температур повітря, що характеризують термодинамічних стан системи, а також відповідні значення коефіцієнтів трансформації дозволили визначити за рівнянням (28) питомі затрати зовнішньої енергії на отримання теплоти для задоволення потреб на опалення і вентиляцію приміщення. Відповідні залежності наведені на Рис. 4. Із рисунка видно, що зі збільшенням відносних витрат

теплоти на опалення в порівнянні з витратами теплоти на вентиляцію приміщення питомі затрати зовнішньої енергії збільшуються, а значить, енергетична ефективність системи зменшується.

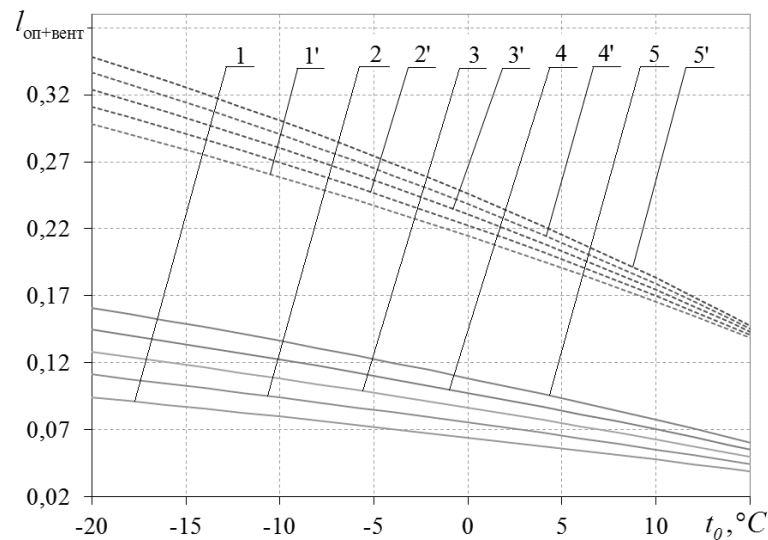


Рис. 4. Порівняння питомих затрат зовнішньої енергії в теплонасосних схемах опалення та вентиляції з утилізацією відпрацьованого повітря: 1, 2, 3, 4, 5 – при $K = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ та $\eta_{\text{TH}} = 0,6$; $K_{\text{рец}} = 0,5$; $\eta_p = 0,6$ і без утилізації: 1', 2', 3', 4', 5' – при $K = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ та $\eta_{\text{TH}} = 0,6$; $K_{\text{рец}} = 0$

Однак в цілому у всьому діапазоні температур зовнішнього повітря енергетична ефективність теплонасосної системи з утилізацією теплоти відпрацьованого повітря залишається надзвичайно високою і 2,3 - 3,5 рази вищою, ніж система без утилізації теплоти відпрацьованого повітря.

Висновки

1. При розрахунку температурного режиму роботи теплонасосної системи повітряного опалення і вентиляції особливості об'єкту теплопостачання можуть бути легко враховані введенням простого коефіцієнта пропорційності між перепадом температур повітря на вході і виході з приміщення і різницею температур всередині і зовні приміщення, що являє собою відношення витрат теплоти на опалення і вентиляцію.
2. Не зважаючи на пониження енергетичної ефективності теплонасосної системи повітряного опалення і вентиляції з утилізацією відпрацьованого вентиляційного повітря зі збільшенням відносних витрат теплоти на опалення в порівнянні з витратами теплоти на вентиляцію, питомі затрати зовнішньої енергії на одиницю продукуюваної теплоти на вході в приміщення залишаються на надзвичайно низькому рівні навіть при низьких температурах зовнішнього атмосферного повітря.

Список літератури

1. Гершкович В.Ф. Особенности проектирования систем теплоснабжения зданий с тепловыми насосами / В. Ф. Гершкович. – К.: Украинская Академия Архитектуры ЧП “Энергоминимум”, 2009. – 60 с.
2. Эволюция тепловых насосов. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», № 9, сентябрь, 2012.
3. Reports at the 10th IEA Heat Pump Conference, Tokyo, 2011.
4. Гершкович В.Ф. Тепловые насосы. Реализованные проекты и нереализованные возможности / В.Ф. Гершкович. – К.: ЗНИИЭП, 2004. – 34 с.
5. Nadorn J.-C. (Editor), Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. – London: Ernst & Young, 2015. –274 p.
6. Степаненко В. А., Афанасьев А. С. «Тепловые насосы в системах теплоснабжения и кондиционирования городов и зданий Украины в 21 веке»// Международная конференция "Тепловые насосы в странах СНГ" – Алушта (Крым, Украина). 2013.
7. Кучерук О., Состояние и перспективы внедрения инженерных систем на тепловых насосах [Електронний ресурс] / О. Кучерук. – Режим доступа <http://www.escoecosys.ru/frames/contents.htm>.
8. Безродний М.К., Притула Н.О. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 272 с.

9. Безродний М.К. Термодинамічна ефективність теплонасосних систем повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря / М.К. Безродний, Н.О. Прутула, І.Ю. Опанасюк // Наукові вісті КПІ – 2019. – № 3. – С.7-15.

10. ДБН В.2.5-67:2013, Опалення вентиляція та кондиціонування- Київ: Мінрегіон України 2013 -113 с.

УДК 621.577 + 697

М.К. Безродний, д-р техн. наук, проф, ORCID 0000-0002-3500-5165
Н.А. Прутула, к-т техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-3500-5165
І.Ю. Опанасюк, студентка, ORCID 0000-0002-3817-8045
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ И РЕКУПЕРАТОРОМ ТЕПЛОТЫ

На сегодняшний день наблюдается большой спрос на возобновляемые источники энергии, поскольку постоянно происходит повышение стоимости природных энергоресурсов и увеличение санкции на установки, которые оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Все больше предприятий в Украине переходят на более современные технологии для обеспечения потребностей потребителей. Таким образом с каждым днем в Украине увеличивается спрос на использование тепловых насосов как альтернативных источников теплоснабжения. Одной из наиболее перспективных сфер применения тепловых насосов являются системы вентиляции и воздушного отопления зданий с большими объемами помещений. Повышение энергетической эффективности таких систем может быть достигнуто путем комбинации тепловых насосов с различными методами утилизации отработанной теплоты. В связи с этим рассмотрена комбинированная система воздушного отопления и вентиляции с рекуператором-утилизатором теплоты и частичной рециркуляцией отработанного вентиляционного воздуха. Целью данного исследования является термодинамический анализ системы и определение характера влияния внешних условий, типа здания и параметров теплоутилизационных устройств на энергетическую эффективность системы теплоснабжения.

В статье проведен термодинамический и численный анализ комбинированной теплонасосной системы воздушного отопления и вентиляции с рекуператором теплоты и рециркуляцией отработанного воздуха с учетом параметров наружного воздуха и типа здания. Определено, что несмотря на понижение энергетической эффективности теплонасосной системы воздушного отопления и вентиляции с утилизацией отработанного вентиляционного воздуха с увеличением относительных затрат теплоты на отопление по сравнению с затратами теплоты на вентиляцию, удельные затраты внешней энергии на единицу вырабатываемой теплоты на входе в помещение остаются чрезвычайно на низком уровне даже при низких температурах наружного атмосферного воздуха. В связи с этим рассмотренная комбинированная теплонасосная система может быть рекомендована как альтернативная система теплоснабжения крупных объектов.

Ключевые слова: теплонасосная система отопления и вентиляции; воздушный тепловой насос; рекуператор; рециркуляция отработанного воздуха.

M. Bezrodny, Dr. Sc. Sciences., Prof, ORCID 0000-0002-3500-5165
N. Prytula, Cand. Sc. Sciences, доц., ORCID 0000-0002-3500-5165
I. Opanasyuk, student., ORCID 0000-0002-3817-8045
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

COMBINED HEAT PUMP AIR HEATING AND VENTILATION SYSTEM WITH RECIRCULATION AND HEAT RECOVERER

Today, there is a great demand for renewable energy sources, because the cost of natural energy resources and sanctions on installations that have a harmful impact on the environment are constantly increasing. More and more enterprises in Ukraine are moving to more advanced technologies to meet consumer needs. Thus, demand for the use of heat pumps as an alternative source of heat is increasing in Ukraine every day. One of the most promising areas for the use of heat pumps is the ventilation and air-heating systems for large-volume buildings. Energy

efficiency increase of such systems can be achieved by combining heat pumps with different methods of heat recovery utilization. In this regard, a combined air heating and ventilation system with heat recovery recuperation and partial exhaust air recirculation is considered. The purpose of this study is to make thermodynamic analysis of the system and determine the influence of the external conditions, the type of building and the parameters of heat recovery devices on the energy efficiency of the heat supply system.

The article deals with the thermodynamic and numerical analysis of the combined heat pump air heating and ventilation system with heat recuperation and exhaust air recirculation taking into account the parameters of the outside air and the type of the building. It is determined that, despite the decrease in energy efficiency of the heat pump air heating and ventilation system with the utilization of exhaust ventilation air with an increase in the relative costs of heat for heating in comparison with the costs of heat for ventilation, the specific costs of external energy per unit of produced heat remain low even at low ambient air temperatures. In this regard, the combined heat pump system is considered to be recommended as an alternative system for the heat supply of large objects.

Keywords: heat pump heating and ventilation system; air heat pump; recuperator; exhaust air recirculation.

References

1. V. F. Gershkovich, Features of Designing Heat Supply Systems for Buildings with Heat Pumps: Ukrainian Academy of Architecture PE "Energominimum", 2009, 60 p.
2. The evolution of heat pumps. Electronic journal of the energy service company Ecological Systems, No. 9, September, 2012.
3. Reports at the 10th IEA Heat Pump Conference, Tokyo, 2011.
4. V.F. Gershkovich, Heat pumps. Implemented projects and unrealized opportunities / V.F. Gershkovich. – K.: ZNIEP, 2004. – 34 p.
5. Hadorn J.-C. (Editor), Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. – London: Ernst & Young, 2015. – 274 p.
6. V. A. Stepanenko, A. S. Afanasyev, "Heat pumps in the heat supply systems and air conditioning of cities and buildings of Ukraine in the 21st century" // International conference "Heat pumps in the CIS countries" – Alushta (Crimea, Ukraine) 2013.
7. O. Kucheruk, Status and prospects for the implementation of engineering systems on heat pumps [Electronic resource] / O. Kucheruk. – Access mode <http://www.escoecosys.ru/frames/contents.htm>.
8. M.K. Bezrodny and N.O. Pritula, Thermodynamic and Energy Efficiency of Heat Pump Heat Supply Circuits. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2016, 272 p.
9. M.K. Bezrodny, Thermodynamic efficiency of heat-pumping systems of repeated heat and ventilation with heat recovery and recycled heat recovery / M.K. Bezrodny, N.O. Pritula, I. Yu. Opanasyuk // KPI Science News. 2019. – No. 3, 7– 15 p.
10. DBN V.2.5-67: 2013, Separated ventilation and air conditioning – Kyiv: Ministry of Ukraine 2013 – 113 p.

Надійшла 10.10.2019
Received 10.10.2019

S. Zaichenko, Prof. Dr., ORCID 0000-0002-8446-5408

S. Shevchuk, Prof. Dr., ORCID 0000-0002-7517-0501

A. Halem, master, ORCID 0000-0002-0593-326X

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN AUTONOMOUS SOURCE OF ELECTRIC ENERGY BY REGULATING THE GAS DISTRIBUTION OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The use of generators with inverters allows, depending on the load of the network, to regulate the speed of the internal combustion engine, thereby reducing fuel consumption and increasing the overall efficiency of the system as a whole. However, it should be noted that the optimal operation of the internal combustion engine is possible at a certain engine speed. A decrease in the engine speed leads to a deterioration in the filling of the fuel-air mixture and the exhaust of the engine, accompanied by an intake of exhaust gases into the intake manifold and the ejection of part of the combustible mixture into the exhaust pipe. The paper presents the general concept of creating a control system for an autonomous power source based on an internal combustion engine and an inverter. The expediency of adjusting the opening and closing angles of an internal combustion engine that works as a source of mechanical energy of an autonomous source of electrical energy is proved. The use of this system allows to reduce unit costs by 2 times when generating electric energy. Based on the gas distribution diagram of the internal combustion engine, the dependence of the change in the opening and closing angles of the intake and exhaust valves on the power of an autonomous energy source is proposed.

Key words: *autonomous energy source, energy conversion efficiency, gas distribution system, electromagnetic valve*

Introduction

In most cases, ensuring reliable energy supply in the event of an external grid failure use autonomous sources of energy based on internal combustion engines. The volume of electricity production in 2017 by autonomous stations is within 6.5 million kWh, with a total production volume of about 5% [1]. The main feature of autonomous energy sources is the kind of fuel used to generate thermal energy from chemical: gasoline, diesel, gas. However, in general, the design and principle of the chemical energy to mechanical converter itself remains similar in basic terms: two- or four-stroke cycle, crank mechanism, piston, cylinder, etc. Second in importance for autonomous energy sources based on an internal combustion engine is the principle of converting mechanical energy into electrical energy. There are two main features of autonomous power sources: no inverters with inverters. The use of generators with inverters allow, depending on the load of the network, to adjust the speed of the internal combustion engine. This will reduce fuel consumption and increase the overall efficiency of the system as a whole. So using this scheme allows to save more than half of the total amount of fuel [2-4].

However, it should be noted that the optimum performance of the internal combustion engine is possible at a certain engine speed [4]. This is evident from the internal combustion engine efficiency diagrams that have a domed shape with a maximum at 2500-3500 rpm depending on the design. The decrease in engine speed causes the fuel-air mixture to fill and the engine exhaust. This process is followed by the intake of exhaust gases into the intake manifold and the ejection of some of the combustible mixture into the exhaust pipe. Energy losses in the event of these effects can reach up to 20%, which significantly reduces the effect of using the inverter when generating electricity.

Among a wide range of standalone generators, the authors have focused on generating installations based on a single-cylinder gasoline four stroke internal combustion engine with a volume of engine 200cm^3 . The choice of the object of study was determined from the analysis of the existing demand of generators and own practice, which is due to the relatively low cost of the generating unit, compared to diesel generators and the minimum required power for the operation of powerful household appliances, which averages 2.2 kW. It should be noted that synchronous generators without inverter remain the most common autonomous source of electrical energy. The peculiarity of the generator without the inverter is the constant speed of the crankshaft of the engine without the ability to adjust the power.

In view of the above, to increase the energy efficiency of an autonomous power source inverter based on an internal combustion engine by regulating the gas distribution mechanism is an urgent scientific task.

The purpose and objectives of the study

The purpose of this study is to determine the algorithm of operation and parameters of the control system of an autonomous source of electric energy with an internal combustion engine by regulating the gas distribution of the internal combustion engine in order to increase the overall efficiency.

© С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, А. Халем, 2019

In order to achieve this goal, the following tasks were solved in the work:

- Development of control scheme for autonomous power supply based on internal combustion engine and inverter.
- Investigation of the change of energy efficiency parameters of the engine-generator-inverter system from the load level.
- Creating recommendations for adjusting the parameters and methods of implementing the control of the internal combustion engine with mini power autonomous power supply.

Material and results of the study

In the analysis of the design of autonomous energy sources based on the internal combustion engine, it should be noted the main components: engine, generator, inverter (Fig. 1).

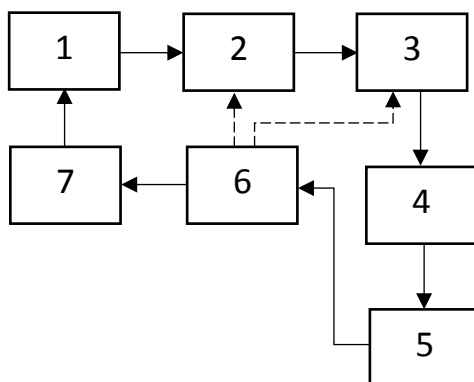


Fig. 1 - Control scheme for autonomous power source based on internal combustion engine and inverter: 1 - internal combustion engine; 2 - generator; 3 - inverter; 4 - wattmeter; 5 - analog-to-digital converter; 6 - microcontroller; 7 - electromagnet driver

A wattmeter is used to control the power level consumed by the energy meter - 4, which is connected to the microcontroller - 5 via an analog - to - digital converter. For more precise control of the parameters of the elements of a standalone generator, it is possible to use channels that connect the microcontroller to the generator and inverter.

In determining the optimal control effects on the constituent elements of the system, consider the need to establish the features of their work under different load separately.

In the system under study, the internal combustion engine is the least energy efficient element. The efficiency of four-stroke internal combustion engines at optimum speed and load is within 45% (50%) of diesel engines and 39% for gasoline. At the same time (Fig. 2), analyzing the graphs [5], the changes in the efficiency of power from the ICE should be noted about a significant (up to 30%) drop with a sharp increase in specific fuel consumption (up to 500%) [6, 7].

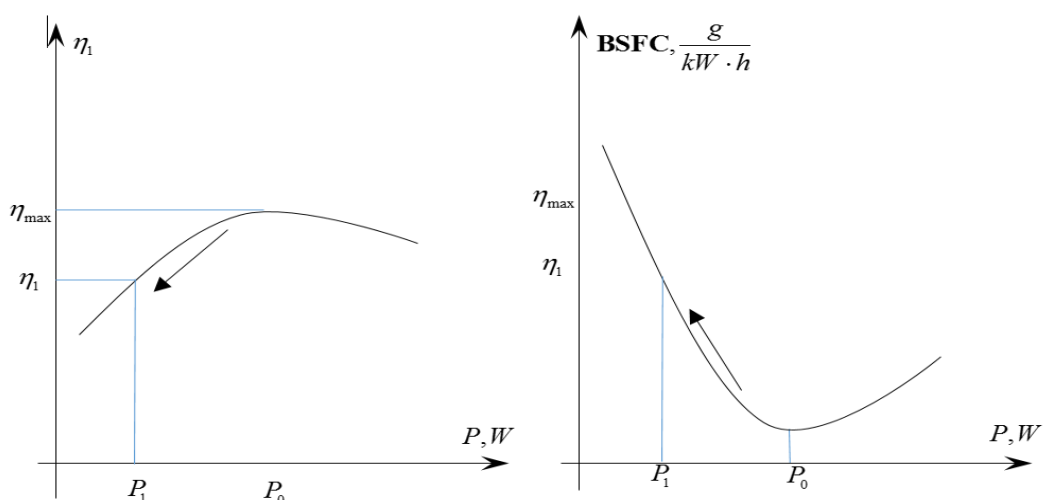


Fig. 2 - Charts of change of efficiency and BSFS

The cause of this phenomenon is a number of negative phenomena that accompany the process of reducing the engine speed. The main concern is the deterioration of the gas filling of the cylinder, the reduction of turbulence with the discharge of part of the charge from the cylinder into the inlet system during the delay of closing the inlet

valve after the NMT. Prevention of this phenomenon is possible by regulating the time and height of valve opening, namely narrowing cycles with late opening and early closing of valves without overlapping [8].

Figure 3a shows a typical diagram of the gas phase distribution of the internal combustion engine at rated speed. The diagram shows the overlap of the corners of the outlet and inlet zones by the magnitude of the inlet and outlet valves. The value of the angles is selected from the condition of obtaining maximum torque and efficiency of the engine [9]. One of the possible options for avoiding these negative phenomena is to minimize the angles of opening of the inlet and closing of the exhaust valves (Fig. 2b) while reducing engine speed.

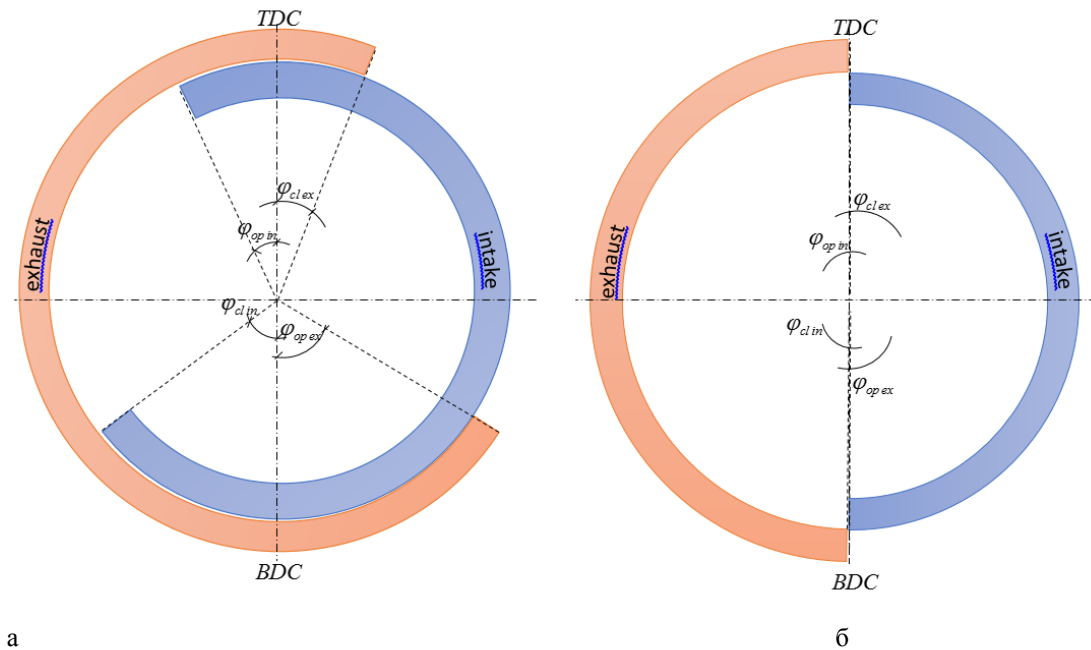


Fig. 3 - ICE phase diagrams:
a - at nominal speed; b - at minimum revolutions

A system of linear equations is proposed to set the angles of opening and closing of the inlet valves from the power level P :

$$\varphi_{op\,in}(P) = \frac{\varphi_{op\,in}}{P_0 - P_1} (P - P_1) ; \quad (1)$$

$$\varphi_{op\,ex}(P) = \frac{\varphi_{op\,ex}}{P_0 - P_1} (P - P_1) ; \quad (2)$$

$$\varphi_{cl\,in}(P) = \frac{\varphi_{cl\,in}}{P_0 - P_1} (P - P_1) ; \quad (3)$$

$$\varphi_{cl\,ex}(P) = \frac{\varphi_{cl\,ex}}{P_0 - P_1} (P - P_1) . \quad (4)$$

The implementation of the proposed method of controlling the gas distribution of the internal combustion engine is possible through the use of special actuators of the gas distribution mechanism. Mechanical, hydromechanical and electric actuators are common. Moreover, among these types of actuators, high-performance twilight actuators are electromagnetically actuated actuators due to the slow movement of the valve with a cam and hydraulic actuator [10, 11].

We define the main parameters of the process of motion of the exhaust valve of the engine under the action of an electromagnet (Fig. 4). When moving the valve 2 down the electromagnet 1 must develop a force F_{em} equal to the total resistance from the action F_1 of the spring 3, from the action of gases F_2 and forces of inertia. In the general case, the equation of motion of the valve is as follows:

$$m_v \frac{d^2 z}{dt^2} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_{em} = 0 , \quad (5)$$

where m_v - the mass of the valve with the anchor.

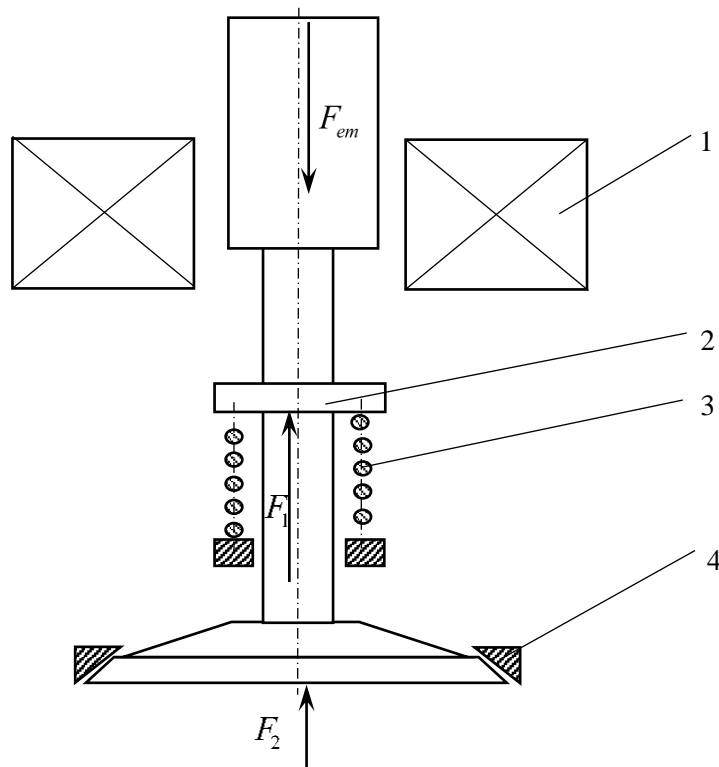


Fig. 4 Scheme of electromagnetic forces exhaust valve:
1 - electromagnet; 2 - valve; 3 - spring; 4 - valve seat

The force of resistance from the action of the spring:

$$F_1 = F_1' + cz, \quad (5)$$

F_1' – previous compression force of the spring;
 c – spring stiffness.

The force of resistance from the action of compressed gases depends on the moment and height of the valve opening. The value of the initial pressure corresponds to the end of the expansion cycle, for the case of a gasoline engine is $p_1 = 0,3-0,4MPa$. Further movement of the valve is accompanied by a rapid drop in pressure to $p_2 = 0,03-0,04MPa$. The valve closes when it is rarefied $p' = 0,035-0,045MPa$.

As noted above, the main advantage of the electromagnetic drive of the engine's gas distribution mechanism is the speed. To determine the required force of the electromagnet in the implementation of uniformly accelerated valve movement, set the parameters of the tachogram of motion (fig. 4). Total valve travel time:

$$t_0 = \frac{\varphi_{opex} + \varphi_{cl ex} + \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (6)$$

ω - the speed of rotation of the crankshaft.

The opening and closing times of the valve in modern cam-driven motors depend on the specified cam profile and in some cases may be equal to the total valve travel time. Assume a fixed value of angles $\varphi'_{opex}, \varphi'_{cl ex}$ in which the exhaust valve will fully open to height h . Valve opening and closing time:

$$t_1 = \frac{\varphi'_{opex}}{\omega}; \quad t_2 = \frac{\varphi'_{cl ex}}{\omega}. \quad (8)$$

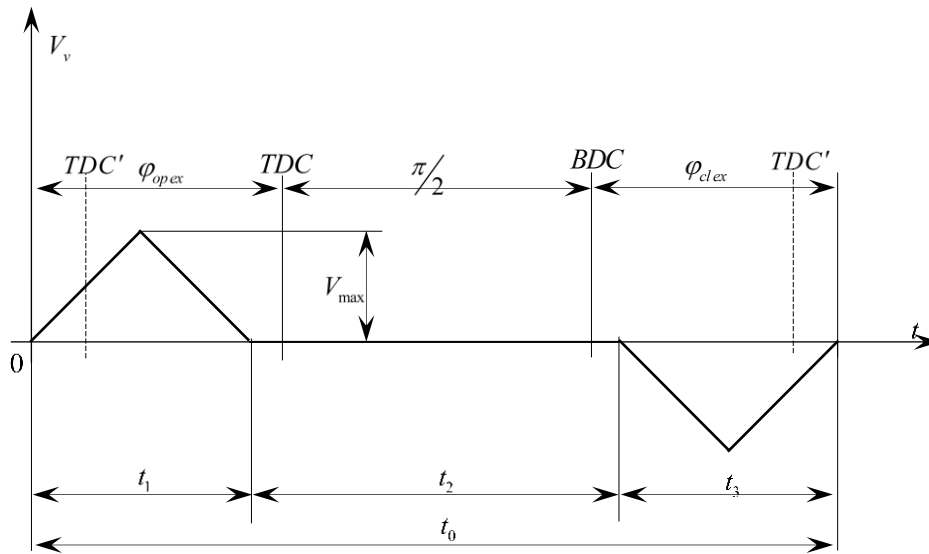
Accordingly, the acceleration:

$$a_1 = \pm 4h \left(\frac{\omega}{\varphi'_{opex}} \right)^2; \quad a_2 = \mp 4h \left(\frac{\omega}{\varphi'_{cl ex}} \right)^2. \quad (9)$$

Given the said force of resistance to the action of compressed gases and rarefaction:

$$F_2 = \frac{\pi D^2 (p_1 - p_2)}{4} t_1 ; F'_2 = \frac{\pi D^2}{4} p' \quad (10)$$

Fig. 4 - Tachograph of movement of the engine exhaust valve at the action of the electromagnet



Expressed from equation (5) with known components, we obtain a system of equations to determine the force of action of the solenoid valve in different parts of the tachogram:

$$\vec{F}_{em}(t) = m_v 4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{opex}} \right)^2 + F'_1 + c \frac{4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{opex}} \right)^2 t^2}{2} + \frac{\pi D^2}{4} (p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{t_1} t), \quad t \in \left[0; \frac{t_1}{2} \right]; \quad (11)$$

$$\vec{F}_{em}(t) = -m_v 4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{opex}} \right)^2 + F'_1 + c \left(\frac{h}{2} + \frac{4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{opex}} \right)^2 \left(t - \frac{t_1}{2} \right)^2}{2} \right) + \frac{\pi D^2}{4} (p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{t_1} \left(t - \frac{t_1}{2} \right)), \quad t \in \left[\frac{t_1}{2}; t_1 \right]; \quad (12)$$

$$\vec{F}_{em}(t) = F'_1 + ch, \quad t \in [t_1; t_0 - t_2]; \quad (13)$$

$$\vec{F}_{em}(t) = -m_v 4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{clex}} \right)^2 + F'_1 + c \left(h - \frac{4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{clex}} \right)^2 (t - (t_0 + t_2))^2}{2} \right) - \frac{\pi D^2}{4} p', \quad t \in \left[t_0 - t_2; t_0 - \frac{t_2}{2} \right]; \quad (14)$$

$$\vec{F}_{em}(t) = m_v 4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{clex}} \right)^2 + F'_1 + c \left(h - \frac{4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{clex}} \right)^2 \left(\frac{t_2}{2} \right)^2 - 4h \left(\frac{\omega}{\phi'_{clex}} \right)^2 \left(t - \left(t_0 - \frac{t_2}{2} \right) \right)^2}{2} \right) - \frac{\pi D^2}{4} p', \quad t \in \left[t_0 - \frac{t_2}{2}; t_0 \right]. \quad (15)$$

From the analysis of equations (11-15) and the tachogram (fig. 4) it is possible to conclude that the greatest effort the electromagnet should develop at maximum revolutions at the beginning of the section $t \in [0; \frac{t_1}{2})$, and the maximum power at the end of the site $t \in [0; \frac{t_1}{2})$ where the valve develops maximum speed:

$$V_{max} = \frac{2h\omega}{\phi'_{opex}} \quad (16)$$

For selection, set the maximum force and power of the electromagnet for the most common type of internal combustion engine used for autonomous energy sources: Honda GX-200. The parameters required for the calculation are shown in table 1.

Table 1 - Parameters of the Honda GX-200 gas distribution system

№ parameter	Parameter	Unit	Value
1	Weight of the valve	<i>kg</i>	0,022
2	Valve opening height	<i>m</i>	0,006
3	Crankshaft rotation speed	<i>c⁻¹</i>	402
4	Valve opening angle	<i>rad</i>	0,35
5	Previous compression force of spring	<i>H</i>	100
6	Spring stiffness	<i>H/m</i>	10000
7	Piston head diameter	<i>m</i>	0,027
8	Initial pressure	<i>Pa</i>	300000
9	The final pressure	<i>Pa</i>	30000

The force of the electromagnet at the beginning of the movement:

$$\vec{F}_{em}(0) = 1,073 \cdot 10^3 N$$

The power and power of the electromagnet at the end of acceleration:

$$\vec{F}_{em}\left(\frac{t_1}{2}\right) = 991 N, N_{em} = 1,362 \cdot 10^4 W$$

It should be noted that a magnet with such parameters is quite large and requires an additional source of energy. However, the amount of energy expended in the valve control process is less than 1% of engine power. This allows the process to be implemented through an autonomous power source with energy storage.

Conclusions

1. The general concept of creation of control system of autonomous power supply on the basis of internal combustion engine and inverter is presented in the work. The feasibility of adjusting the angles of opening and closing of the internal combustion engine operating as a source of mechanical energy of an autonomous source of electricity has been proved. Application of this system allows to reduce specific costs by 2 times when generating electricity.

2. The diagram of the phase gas distribution of the internal combustion engine (Fig. 3, a) for the conditions of minimum energy generation is proposed. On the basis of the diagram of the phase gas distribution of the internal combustion engine, the dependence of the change of the angles of opening and closing of the inlet and outlet valves on the capacity of the autonomous energy source (1-4) is proposed.

3. The equation of dynamics of motion in the valve with electromagnetic actuator is established. On the basis of the equation of motion dynamics, the force of the magnet is determined in the implementation of evenly accelerated valve movement. From the analysis of equations (11-15) and the tachogram (fig. 4) it is found that the greatest effort is the electromagnet develops at maximum revolutions $1,073 \cdot 10^3 N$ at the beginning of the section, and the maximum power $1,362 \cdot 10^4 W$ at the end of the section where the valve develops the maximum speed.

Bibliography

1. Intelligent electric power systems: elements and modes: Under the general. ed. Acad. NAS of Ukraine A.V. Kirilenko / Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. - K.: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2014. -- 408 p.
2. Galiullin R. R. On the issue of regulating the rotational speed of the crankshaft of a diesel autonomous power plant of low power // Vestnik BGAU. - 2012. -- S. 37-40.
3. Bashirov R.M. Fundamentals of the theory and calculation of automotive engines. Ufa: BGAU, 2008. 304 p.
4. Galiullin R.R., Gaysin E.M. Regulation of diesel engines by skipping fuel supplies // Mechanization and Electrification of Agriculture, 2005. No. 11. P. 30-31.
5. Kozlov A.N., Khudyakova G.I., Svishchev D.A. Efficiency of the internal combustion engine using synthesis gas // Energy and Resource Saving. Power supply. Unconventional and renewable energy sources. — Yekaterinburg, 2016. - 2016. - S. 548-552.
6. Khvatov O.S., Daryenkov A. B., Samoyavchev I. S. Fuel efficiency of a single power plant of an autonomous facility based on an internal combustion engine of variable rotational speed // Operation of sea transport. - 2013. - No. 1. -- S. 71.
7. Alekseenko V. A., Yurov B. B., Ostapenko V. V. Load characteristic of the carburetor engine // Collection of scientific papers Sworld. - 2014. - T. 2. - No. 2. - S. 29-31.
8. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. — S. 151-158.

9. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. Methods for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 181-189.

10. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. The methodology for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 96-105.

11. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. - S. 151-158.

УДК 621.43

С.В. Зайченко, проф. Д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408

С.П. Шевчук, проф. Д-р, ORCID 0000-0002-7517-0501

А. Халем, магістр, ORCID 0000-0002-0593-326X

**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Использование генераторов с инверторами позволяют в зависимости от нагрузки сети регулировать частоту вращения двигателя внутреннего сгорания, таким образом уменьшать расход топлива и повысить общий коэффициент полезного действия системы в целом. Однако следует отметить, что оптимальная работа двигателя внутреннего сгорания возможна при определенной частоте вращения двигателя. Уменьшение частоты вращения двигателя приводит к ухудшению наполнения топливо-воздушной смесью и выпуска отработавших газов двигателя, сопровождающееся впуском выхлопных газов во впускной коллектор и выброса части горючей смеси в выхлопную трубу. В работе представлена общая концепция создания системы управления автономным источником питания на базе двигателя внутреннего сгорания и инвертора. Доказана целесообразность регулирования углов открытия и закрытия двигателя внутреннего сгорания который работает, как источник механической энергии автономного источника электрической энергии. Применение данной системы позволяет уменьшить удельные затраты в 2 раза при генерации электрической энергии. На основе диаграммы фазового газораспределения ДВС предложено зависимость изменения углов открытия и закрытия впускного и выпускного клапанов от мощности автономного источника энергии.

Ключевые слова: автономный источник энергии, коэффициент полезного действия, система газораспределения, электромагнитный клапан

УДК 621.43

С.В. Зайченко, проф. Д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408

С.П. Шевчук, проф. Д-р, ORCID 0000-0002-7517-0501

А. Халем, магістр, ORCID 0000-0002-0593-326X

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ШЛЯХОМ РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОРОЗПОДІЛУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Використання генераторів з інверторами дозволяють в залежності від навантаження мережі регулювати частоту обертання двигуна внутрішнього згоряння, таким чином зменшувати витрату палива і підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи в цілому. Однак слід зазначити, що оптимальна робота двигуна внутрішнього згоряння можлива при певній частоті обертання двигуна. Зменшення частоти обертання двигуна призводить до погіршення наповнення паливо-повітряною сумішшю і випуску

відпрацьованих газів двигуна, що супроводжується впусканням вихлопних газів у впускний колектор і викиду частини горючої суміші в вихлопну трубу. У роботі представлена загальна концепція створення системи управління автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згоряння і інвертора. Доведено доцільність регулювання кутів відкриття і закриття двигуна внутрішнього згоряння який працює, як джерело механічної енергії автономного джерела електричної енергії. Застосування даної системи дозволяє зменшити питомі витрати в 2 рази при генерації електричної енергії. На основі діаграми фазового газорозподілу ДВС запропоновано залежність зміни кутів відкриття і закриття впускного і впускного клапанів від потужності автономного джерела енергії.

Ключові слова: автономне джерело енергії, коефіцієнт корисної дії, система газорозподілу, електромагнітний клапан

Надійшла 09.10.2019

Received 09.10.2019

L. Kulakovskiy, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1273-6894
A. Bosak, Cand. Sc. (Eng.) ORCID 0000-0003-0545-9980
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CREATING FACTOR MODEL OF THE PEAT DRYING PROCESS IN PNEUMATIC STEAM-WATER DRYER

For countries with significant reserves of peat is an important issue of energy-efficient production of peat briquettes. The article states about the necessity of determining the optimal equipment's operation regimes of peat briquettes production. This especially due to the plants with a pneumatic steam-water peat dryer. These dryers are characterized by high productivity and low peat losses compared to factories with other types of dryers. This is achieved by the fact that the drying agent is used in a closed circuit and the heat of low-potential vapor is used. However, the drying process in this dryer has high energy consumption. That is why finding ways to reduce electricity consumption is a key task for implementing these dryers in production. The data and technology of operation the pneumatic steam-water dryer for creating a factor field of process was analyzed in article. In this paper, the basic parameters of peat that affect the peat drying regime, parameters of peat that are changed during the drying process and the parameters of the drying peat quality are determined. There were highlighted the disturbance effects and initial parameters of the model of peat drying process from them. The main controllable and uncontrollable effects and output parameters of the drying process also were chosen. Based on the analysis of the factors of the peat drying process and the developed functional model for the energy technology of the peat drying process, it was determined the interrelations of the output parameters from the input disturbances and control influences. It was revealed that the main output parameter of the model is the parameter of electric consumption. The value of this parameter for the certain operating regimes should be minimized with the observance of qualitative indicators of the dried peat and the level of heat consumption by determining the necessary values of control effects.

Keywords: peat, dried peat, pneumatic steam-water dryer, drying enclosures, cyclone.

1. Introduction

In many countries with a high level of agility, the Energy Strategies decelerate increasing the peat fuel production, in particular peat briquettes (Energy Strategy of Russia for the period up to 2030, Field Program for the Development of Peat Industry Organizations in Belarus, National Development Plan of Estonia, Concept of Development the peat industry of Ukraine until 2030, etc.). In order to achieve these goals, first, it is necessary to determine the optimal equipment's operation regimes. The peculiarities of the process of production of peat briquettes depend on the type of dryers installed at the plant. Determining the optimal operation regimes of dryers is not possible without the formation of an adequate factor field, describing the character of the drying process. Systematic analysis of the peat drying process for identifying the character and level of the relationship between the input parameters that objectively affect the process, and the output technical and economic parameters should be done.

An analysis of the drying process was carried out on the example of the Littleton peat briquetting plant (Republic of Ireland), where the pneumatic steam-water dryer (Peco dryer) is used. The choice of a plant with Peco dryer is that these plants are closed in recent decades. The reasons for closing were the depletion of peat deposits and high consumption of electric energy in the process of producing briquettes at these plants. In particular, in the 1990s, the Zamglay and Buchman peat briquettes plants (Ukraine) were close, in the 2000's Tuotsi (Estonia), Krokhan (Republic of Ireland) and there is a plan to stop else on in Derinlou (Republic of Ireland). As showed the results of the study of the operating regimes of steam tubular dryers, passing the operating regimes for optimal parameters allowed to reduce the electricity capacity of the drying process for more than 0,3 kWh/ t dried peat [1].

The purpose of the study is to find the necessary set of factors that influence to the process of drying peat in pneumatic steam-water dryers. It will allow to determine the main regime's parameters of the drying process for constructing a model of a dryer operation with optimal complexity.

2. Statement of the material

Drying of peat in pneumatic water-steam dryers occurs in five tube drying enclosures. In three of them, as a steam from the power plant is used as heat transfer agent. They are called enclosures of the first effect heat usage. Two enclosures (enclosures of the second effect) are heated with water. Water is heated due to the use of steam condensation. This steam is exuded from the peat during drying in the enclosures of the first effect [2].

Factory data provided by Littleton plant, Bord na Mona company (Republic of Ireland) indicates that in an hour this plant with pneumatic steam-water dryer produces only about 18 tons of briquettes from 45 tons of peat.

©Л.Я. Кулаковський, А.В. Босак, 2019

At the same time, at Manevitskyi peat-briquetting plant in Ukraine, for the production 1 ton of peat briquettes is spent 1,7-1,9 ton of peat [3]. At this plant, a pneumatic gas dryer is used. The loss of peat in a mass equivalent in the drying process consists of the moisture loss during the drying process, the loss of the peat with the removal of their particles by the drying agent through the cyclones, the loss with their penetration into the sludge water and the losses in pipes, as a result, of its clogging.

The loss of moisture in the drying process is characterized by such indicators as the productivity of evaporating moisture W kg/h, an amount of peat entering the installation G_1 and an amount of the dried peat [4]:

$$G_1 = G_2 + W, \text{ kg/h}; \quad G_2 = G_1 - W, \text{ kg/h} \quad (1)$$

By the known values of productivity of evaporating moisture and moisture content of peat before and after drying, it is possible to determine the productivity by the input and dried peat using the following formulas:

$$G_1 = W \frac{100-w_2}{w_1-w_2}, \text{ kg/h}; \quad G_2 = W \frac{100-w_1}{w_1-w_2}, \text{ kg/h},$$

where w_1 and w_2 – moisture content before and after drying, %.

Loss of peat with the removal of their particles by the drying agent depends on the efficiency of the cyclones, the concentration and aerosols' speed of movement. According to some estimates, the loss of dried peat is more than 10% [4].

The Peco dryer is equipped with three centrifugal fans designed to transport the peat mixture through the system (Fig. 1). Peat entering to the mixing chamber is picked up by airflow and is injected into the dryer's pipes. After exiting from the pipes, the peat-air mixture enters the guide chamber (helmet) and further into cyclone. In the cyclone, the deposition of the main mass of peat occurs. The air with small particles of peat is directed to the exhaust pipe of the cyclone. After that, it is sent to the second stage of purification (mechanical dry dust collectors or wet dust collectors, dry cyclones with additional fans at the end of the system). The speed of the peat movement in the pipes determines the time of peat passing through the dryer of the corresponding enclosure and directly affects on the drying process and the quality of dried peat. Therefore, the rotational speed of the engine of radial fans (two fans in water-driers IIA and IIB enclosure and one in steam enclosure of dryers), and consequently, their productivity should be included in the model. The first two enclosures are operated by open cycle with a single use of a drying agent. The air entering the drying enclosure absorbs moisture evaporated from peat and, after appropriate purification, is disposed of through the separation apparatus. Therefore, it is important to know the outside temperature, which is the initial temperature of the drying agent of the two water enclosures. In the enclosures of effect I, a drying agent is recycled. These enclosures are operated by a closed cycle. The air supplied by the fan to the fifth enclosure (IA) passes sequentially through all enclosures of I effect and absorbs moisture that is evaporated during the drying process. This air is not emitted into the atmosphere as in the enclosures of effect II. It is returned to the fan for re-use after partial drainage and heating in the heater (calorifier). Therefore, the additional regulating parameter for the enclosures of the I effect is the temperature of the air from the heater.

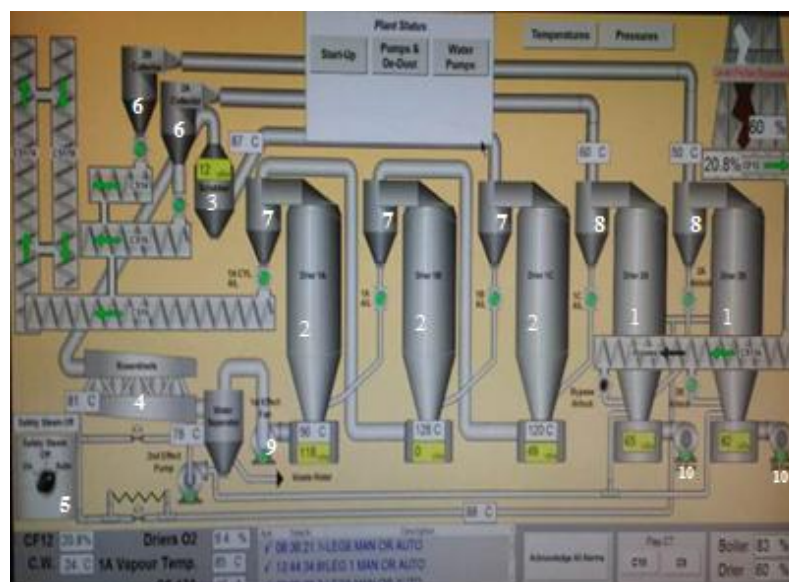


Figure 1 – Diagram for the operation of the Peco drying complex at the Littleton plant, where 1 – is the drying enclosure of the II effect, 2 – is the drying enclosure of the I effect, 3 – is a scrubber, 4 – is a heater, 5 – is a boiler, and 6 – are battery cyclones of the second stage of purification of IIA and IIB enclosures, 7 – drying cyclones of the II effect, 8 – cyclones of the I effect dryers, 9 – high pressure fan of the IA, IB, IC dryers, 10 – high pressure fan of IIA, IIB dryers

It is necessary include to the model of drying process such parameters of the heat transfer agent as the temperature of the waste steam from the turbine entering to the steam drying enclosures and the temperature of the hot water coming from the heat exchanger. The heat of moisture that evaporates from the peat in steam enclosures is used for drying peat in water enclosures. The utilization of the heat of a wet drying agent exiting the steam enclosures (I effect) is carried out in a scrubber. Saturated with damp and dusty mixture of air and peat particles in a scrubber is washed with water. This water contact with a utilized drying agent. It is heated, but is not used as a heat transfer agent for dryers due to purification and chemical aggressiveness. So, this water is fed to the heat exchanger. There heat exchange from sludge to pure water is proceed. Pure water is circulating between the heat exchanger and the IIB and IIA enclosures. Therefore, as a disturbing factor it can be taken into account the temperature of cold water. Although in the drying process, heat consumption by the Peco drying complex is not significant compared to other types of dryers (pneumatic gas), since low-potential heat carrier and steam extraction from a turbine are used. However, this parameter must be included in the drying process model.

One more regulative parameter is the load of peat driers. The supply peat to the dryer is regulated by changing the speed of the auger.

The peculiarity of drying peat in a pneumatic steam-water dryer is a significant consumption of electricity (40 kWh / ton of briquettes) [5]. This is due to the pneumatic transport of peat in the drying process through five enclosures (energy consumption for the operation of radial fans) and to ensure the circulation of water under the scheme of heat exchanger-scrubber and heat exchanger-drying enclosures by circulating pumps. Therefore, it is necessary to develop the operation regimes of the drying complex with a minimum of electric energy consumption to obtain a dried peat of the required quality. The bog piles of peat have widely different characteristics and blending help to achieve necessary results.

Output parameters of the drying process are also parameters of the quality of dried peat.

It should be noted, that the factory produces briquettes and granules of various sizes. This is for customers wishing to supply smaller briquettes for specially designed combustion devices for smaller fuels. Therefore, the dried peat moisture variation should be low – up to 2%.

The analysis of physical and mechanical properties of peat and dried peat is given in Table 1.

Table 1 – Physical and mechanical properties of peat and dried peat that determine the character of the peat drying process

The main parameters of quality of the dried peat	Parameters of peat, which vary considerably during the drying process	Parameters of peat affecting the peat drying regime
- fractional composition	- moisture	- moisture
- moisture	- moisture variation	- moisture variation
- moisture variation	- temperature	- temperature
- bulk density		- bulk density
- temperature		- fractional composition
- ash content		- flowability
		- ash content

A large difference in the quality of peat that supply to the plant are characterized for Ireland’s plants. According to the Litellon plant data, the moisture varies from 40% to 60%, the ash content is from 3% to 10%, the bulk density is from 260 kg/m³ to 360 kg/m³, the level of impurities (wood, moss) is also different. So, there were installed a blending bunker and hammer mills at the plant for the averaging of these parameters and reduction fractional composition of peat particles. Some 200 wagons per day from 3 or more bog piles are blended in this way and a mean value for each of the peat physical characteristics is obtained.

Since the peat passes through pipes of diameter 55 mm, it is necessary to control the physical and mechanical properties of peat, in order to reduce the probability of tube jamming (large size, bulk density) and to decrease erosion process from high ash content. Therefore, it is necessary at the entrance to the dryer control the moisture content, moisture variation, bulk density, ash content, fractional composition of peat. According to laboratory studies [6], the increasing of the peat temperature from 15 °C to 100 °C has increased the strength of briquettes by 40% by 25-times loaded. Therefore, such factors as temperature of peat and dried peat should also be included in the model. The bulk density, fractional composition and ash content are changed not too significantly during the drying process. So, these parameters of the dried peat are not included into the model of the drying process. Block diagram of the drying process in pneumatic steam-water dryers is presented in Fig. 2.

The analysis of the factor field, energy and technical indicators of the drying process in Peco dryer allowed to identify the main factors and parameters in mathematical model of drying process.

Parameters Y_1, Y_2, \dots, Y_5 – are the outputs of the system which should be optimized and controlled. The input variables that are manipulated to obtain the desired outputs are denoted by X_1, X_2, \dots, X_5 . The disturbances that act on the system are represented by Z_1, Z_2, \dots, Z_9 . When the values of Z_1, Z_2, \dots, Z_9 , change, the outputs variables $Y_1,$

Y_2, Y_3 will also change. To adjust the outputs to the desired values, optimal values of inputs X_1, X_2, \dots, X_5 . Based on the analysis of the factors of the peat drying process and the developed functional model for the energy technology of the peat drying process, it is necessary to determine the interrelations of the initial parameters Y_j from the input disturbances and control influences and obtain a model of the type:

$$Y_j^m = \sum_{k=1}^N \beta_{jk} \psi_k(X_1, \dots, X_5; Z_1, \dots, Z_9),$$

where β_{jk} – is an unknown parameter (constant) while $\psi_k(\cdot)$ is a chosen set of basis functions, $N=12$; and $k \in \{1, \dots, 5\}$: $\psi_k = X_k$; or $k \in \{6, \dots, 15\}$: $\psi_k = Z_k$.

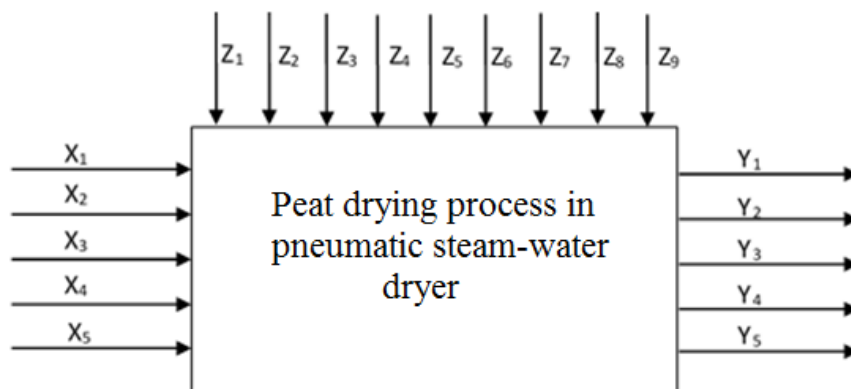


Figure 2 – Functional description of the model of the drying peat process in the pneumatic steam-water dryer, where Y_1 – dried peat moisture content, Y_2 – dried peat moisture variation, Y_3 – dried peat temperature, Y_4 – electrical energy consumption, Y_5 – thermal energy consumption, Z_1 – peat moisture, Z_2 – peat bulk density, Z_3 – peat moisture variation, Z_4 – peat ash content, Z_5 – peat temperature, Z_6 – peat flowability, Z_7 – peat fractional composition, Z_8 – air temperature, Z_9 – pure water temperature, X_1 – auger rotational speed, X_2 – air temperature from heater, X_3 – steam temperature, X_4 – fans flow rate of drying II enclosures, X_5 – fan flow rate of drying I enclosures

In order to get the optimal output parameters Y_1, Y_2, \dots, Y_5 , it is necessary to calculate and adjust the optimal values of the input control factors X_1, X_2, \dots, X_5 .

3. Conclusions

It was found that the consumption of electricity of the peat drying process in Peco dryer is the highest among other dryers. Therefore, the output parameter of electricity consumption should be in the target function of the mathematical model of the drying process. Controlled (regulating) factors of the model are fan speed, steam temperature, air temperature at the outlet from the heater and the auger rotational speed. The factors that carry out uncontrolled (disturbing) influence on the drying process in pneumatic steam-water dryers are moisture, moisture content, bulk density, flowability, fractional composition, temperature, and ash content of peat, temperature of pure water and air temperature.

In further research, it is necessary to plan the experiment and carry out industrial experiments at the peat briquetting plant. According to the obtained data, it is necessary to construct a mathematical model of the drying process and to develop optimal regime parameters. This model will allow to achieve optimal values of the output parameters by optimizing the control effects for certain values of disturbing influences.

References

1. Kulakovskiy L. Ya. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti enerhotekhnolohichnoho kompleksu sushinnia na torfobrykethnomu vyrobnytstvi [Increasing the energy efficiency of the energy technology complex of drying in the peat-briquetting industry]. / avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. : spets. 05.14.01 "enerhetychni systemy ta komplekxy", Kyiv, 24 p, 2017.
2. J. Martin, Mechanical Section/ Irish Engineers Journal Supplement, pages 34-37, 1970.
3. V Gneushev and I. Kyrychuk Problemy roboty torfobrykethnykh zavodiv za nestachi vyrobnychkh poliv [Problems of peat briquetting factories due to the lack of production fields]. / Uhol Ukrainy, February 2016, pages 43-47, 2016
4. V. Naumovych Iskusstvennaia sushka torfa [Artificial drying of peat] / Moskva, Nedra, 222p, 1984.
5. J. Martin Briquetting of peat fuel, Proc. Inst. Briquet. Agglom. Bien. Conf., 14, pages 153-171, 1975
6. D. Zverev Puty usovershenstvovaniya torfobrykethnogo proyzvodstva [Ways to improve peat briquette production]. / Mekhanycheskaia pererabotka i transport torfa, pages 3-11, 1964.

Л.Я. Кулаковський, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-1273-6894

А.В. Босак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-0545-9980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ ФАКТОРНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОРФУ В ПНЕВМОПАРОВОДЯНИХ СУШАРКАХ

Для держав із значними запасами торфу гостро стоїть питання енергоефективного виробництва торфобрикетів. В статті проведено аналіз даних та технології роботи пневмопароводяних сушарок, що застосовуються на торфобрикетних заводах. В роботі було виконано розробку факторного поля процесу сушіння в пневмопароводяній сушарці. Проаналізовано якісні характеристики торфу, що надходить на торфобрикетний завод, сушенки та характеристики торфу, що змінюються в процесі сушіння. Серед них були виділені характеристики, що були віднесені до збурюючих неконтрольованих впливів та вихідних параметрів системи. Аналіз і формування збурюючих впливів дозволив сформулювати достатню кількість неконтрольованих факторів моделі. Для компенсації їх впливу на процес сушіння було виділено контрольовані фактори. Встановлено, що основним вихідним параметром моделі є параметр електроспоживання, значення якого при певних режимах роботи повинно бути мінімізовано з дотриманням якісних показників сушенки і рівня теплоспоживання за рахунок встановлення необхідних значень керуючих впливів.

Ключові слова: торф, сушенка, пневмопароводяна сушарка, сушарні корпуси, циклон.

Надійшла 07.11.2019

Received 07.11.2019

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.313.13-133.32

М.А. Коваленко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5602-2001
О.О. Самойленко, магістр, ORCID 0000-0002-6540-8109
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Матеріали статті представляють собою результат практичної розробки, що присвячена розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик машин постійного струму малої потужності. За результатами роботи розроблено принципову схему для дослідження даних машин на основі мікроконтролера. Традиційні засоби вимірювання струму, напруги, швидкості обертання замінено сучасними давачами. Фіксування та обробка результатів дослідження виконується на персональному комп'ютері в напівавтоматичному режимі. Також, розроблено програмне забезпечення для реалізації необхідної програми випробувань: неробочих хід, коротке замикання і т.ін. за допомогою розробленого стенду можливо проводити випробування машин постійного струму як в режимі двигуна так і в режимі генератора, що суттєво підвищує його універсальність при незначних габаритних розмірах. Апаратна частина стенду є мобільною, тобто за допомогою одного блоку можливо забезпечити випробування різних машин. Застосування в якості регуляторів постійної напруги ШІМ дозволило знизити габаритні розміри та підвищити надійність експериментального стенду в цілому за рахунок відмови від масивних реостатів.

Ключові слова: експериментальний стенд, машина постійного струму, параметри та характеристики, електромагнітне збудження

Вступ Машини постійного струму з електромагнітним збудженням широко застосовуються в різних галузях промисловості, побуті, техніці, науці і т. ін. Їх значне використання та популярність пояснюється наявністю експлуатаційних параметрів та характеристик, таких як: високий пусковий і перевантажувальний момент, висока швидкість, широкий діапазон плавного регулювання частоти обертання.

Електричні машини постійного струму потужністю від десятка до сотень ват мають широке застосування в електроприводах гнучких виробничих систем, промислових роботів, систем автоматики і транспортних засобів. Вони також застосовуються в навчальному процесі для студентів енергетичного та електромеханічного профілю.

В роботі проведено аналіз існуючих стендів для випробування машин постійного струму. Основні вимоги до таких стендів були сформовані ще за радянського союзу і регламентуються відповідними ГОСТ, на основі яких сформовані основні етапи та процедури випробування таких машин [1-3]. Це класичні системи, що представляють собою сам досліджуваний агрегат та навантаження/привідний двигун. Для навантаження генераторів та двигунів постійного струму використовувались багатоступінчаті реостати великої потужності. Для регулювання струму збудження в обмотці збудження таких машин використовувались проволочні реостати. Програмою таких випробувань передбачено отримання робочих характеристик P_1 , I_a , η , $n = f(P_2)$, регульовальних характеристик для двигунів $n = f(I_3)$ та генераторів $I_3 = f(I_a)$.

Відомо і сучасні засоби та методи для проведення випробувань малопотужних машин постійного струму.
© М.А. Коваленко, О.О. Самойленко, 2019

струму. В загальні вони представлені в роботах [4-7]. В основу даних стендів покладено сучасні мікропроцесорні системи в сукупності із ШІМ, цифровими вимірювальними пристроями та комп'ютеризованими засобами обробки та візуалізації отриманих результатів. Подальший аналіз результатів проводиться в ручному або автоматичному режимі. Однак, основним недоліком таких систем є їх висока вартість та необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі, складність пуску та наладки таких систем.

На сьогоднішній день матеріально-технічна база більшості навчальних закладів, особливо технічних спеціальностей, суттєво застаріває. Це пов'язано як із бурхливим розвитком науки і техніки в цілому так і з слабким державним фінансуванням. Тому стоїть актуальне завдання оновлення матеріально-технічної бази вищих навчальних закладів та розробку сучасних компактних, недорогих та багатофункціональних стендів, що стануть основою для проведення лабораторних робіт, практичних занять, науково-дослідних робіт і т.ін. З іншого боку ростуть вимоги до енергоресурсозбереження, що вимагає зниження встановленої потужності досліджуваних агрегатів. Нові стенди мають бути достатньо надійними і містити мінімальну кількість небезпечних в експлуатації предметів (наприклад реостатів, навантажувальних тумб, відкритих контактних з'єднань). Основою таких стендів повинні бути сучасні цифрові пристрої, що виконують функції регулятора та контролера всіх електричних величин. Для підвищення безпеки роботи із таким обладнанням необхідно зменшувати робочу напругу до мінімально можливої, що підвищить безпеку під час проведення робіт з таким обладнанням.

Мета та завдання роботи полягає в розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик малопотужних машин постійного струму з метою оновлення матеріально-технічної бази, зниження енергоспоживання, підвищення надійності лабораторного обладнання, підвищення безпеки під час роботи з обладнанням. Основним завданням в роботі є розробка принципової електричної схеми для випробування машин постійного струму та програмного забезпечення для керування та обробки результатів випробувань.

Матеріал і результати досліджень За основу в роботі взята малопотужна машина постійного струму ТІП незалежного збудження з наступними параметрами (табл. 1.)

Таблиця 1 - Номінальні параметри досліджуваної МПС

№	Параметр	Величина
1	Номінальна робоча напруга	110 В
2	Номінальний струм якоря	2,35 А
3	Номінальна потужність	240 Вт
4	Номінальна швидкість обертання	3300 об/хв
5	ККД	
6	Тип збудження	незалежний
7	Опір обмотки збудження	980 Ом
8	Режим роботи	S1

На основі проведеного літературного пошуку для розробки експериментального стенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням сформовано ряд принципів вимог:

- сумарна споживана потужність установки не має перевищувати 1,0 кВт з метою енергоресурсозбереження;
- номінальна робоча напруга не повинна перевищувати 110 В з метою підвищення безпеки під час роботи з обладнанням;
- традиційні реостатні системи регулювання струму та напруги замінити ШІМ, з метою забезпечення компактності, підвищення надійності та зменшення енерговитрат;
- традиційні вимірювальні вольтметри та амперметри замінити відповідними цифровими давачами струму та напруги;
- забезпечити стенд цифровим вимірювачем швидкості;
- для обробки результатів та керування стендом використовувати мікроконтролери з простою можливістю інтеграції із персональним комп'ютером.

Стенд змонтований на базі популярного мікроконтролеру Arduino Nano (Atmega328p) (Рис. 1), який повністю відповідає поставленим вимогам та завданням і може їх реалізувати. Він може подавати на силові ключі ШІМ сигнал що дозволить плавно регулювати МПС.

Даний мікроконтролер має можливість перетворювати аналогові сигнали з давачів струму та подільників напруги на цифрові та передавати ці данні на комп'ютер за допомогою віртуального терміналу через USB-порт. За допомогою вбудованого таймеру та зовнішнього фотодатчику можливо реалізувати точний вимір частоти обертів машин.

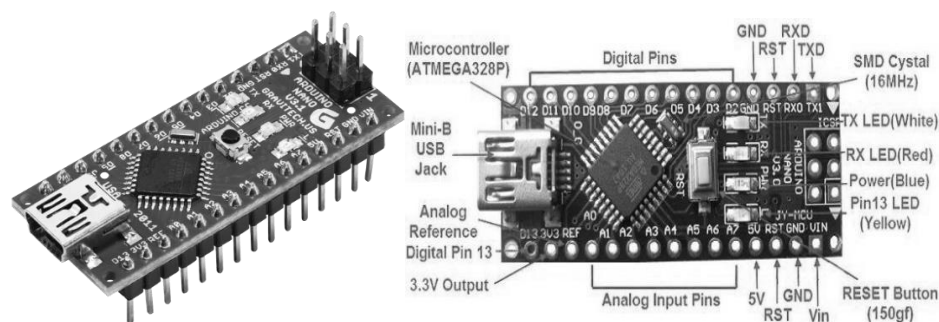


Рис. 1. Основа стенду – мікроконтролер Arduino Nano

Стенд представляє собою дві електричні машини постійного струму, що з'єднуються між собою муфтою. Їх обмотки (якоря і збудження) послідовно з'єднані з джерелом живлення через датчики струму і силові ключі, які у свою чергу під'єднані до контролера. Наруга для вимірювання АЦП понижується резистивним дільником. Частота обертів вимірюється фотодатчиком.

Платформа Nano, побудована на мікроконтролері ATmega328 (Arduino Nano 3.0) або ATmega168 (Arduino Nano 2.x), має невеликі розміри і може використовуватися в лабораторних роботах. Вона має схожу з Arduino Duemilanove функціональність, проте відрізняється складанням. Відмінність полягає у відсутності силового роз'єму постійного струму і роботі через кабель Mini-B USB. Основні характеристики Arduino Nano, що використовується в складі розробленого стенду наведено в табл. 2.

Таблиця 2 - Основні характеристики Arduino Nano

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічна рівень)	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (граничне)	6-20 В
Цифрові Входи / Виходи	14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ)
Аналогові входи	8
Постійний струм через вхід / вихід	40 м
Флеш пам'ять	16 Кб (ATmega168) або 32 Кб (ATmega328) при цьому 2 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	1 Кб (ATmega168) або 2 Кб (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) або 1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри	1.85 см x 4.2 см

Для вимірювання постійного струму в обмотці якоря та збудження досліджуваних машин використовується доступний давач струму типу ACS712 (рис. 2).



Рис. 2. Давач струму ACS712

Датчик струму ACS712 заснований на принципі, відкритому в 1879 році Едвіном Холлом (Edwin Hall). Мікросхема ACS712 випускається в мініатюрному 8-вывідному корпусі SOIC для поверхневого монтажу. Вона складається з прецизійного лінійного датчика Хола з малою напругою зміщення і мідним провідником, що проходить біля поверхні чіпа і виконує роль сигнального для струму. Вбудований формувач сигналу фільтрує створюване чутливим елементом напругу і підсилює її до рівня, який може бути визначений за допомогою АЦП мікроконтролера.

Силовой основою стенду є транзистори. Вони виконують функцію регулятора напруги в обмотці якоря та збудження, використовуються для плавного пуску випробувальних двигунів. В роботі використовуються транзистори типу MOSFET IRF250 (200 V 30 A) для ланцюга обмотки якоря і MOSFET IRF840 (500 V 8,8 A) для ланцюга обмотки збудження (рис. 3).

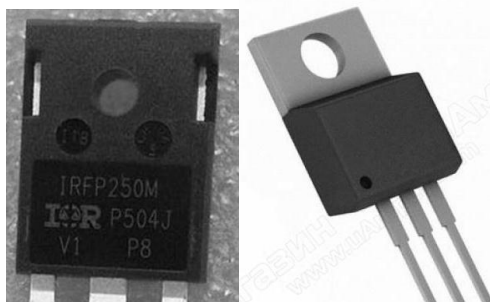


Рис. 3. N-канальний MOSFET IRF250 та IRF840

Перевагою використання MOSFET в якості логічних перетворювачів очевидна, оскільки вони в статичному режимі не споживають енергії. Дійсно, незалежно від логічного стану на виході, завжди один із послідовно включених транзисторів є «відкритий», а інший «закритий», тому струм через них не протікає. Проте при перемиканні із одного стабільного стану в інший (перехідний процес) звичайно струм протікає, і його слід враховувати (особливо при високих тактових частотах логічних схем). Крім того дані транзистори досить розповсюджені, що обумовлює їх невисоку вартість та доступність.

Для вимірювання швидкості обертання використовується оптичний цифровий датчик (рис. 4).



Рис. 4. Оптичний давач швидкості

Оптичний давач швидкості являє собою оптопару. Оптопара – оптоелектронний напівпровідниковий прилад, який складається з випромінювача та приймача випромінювання, між якими є оптичний зв'язок і забезпечена електрична ізоляція. Для роботи такого давача необхідно розмістити на валу двигуна диск або шматок твердого виробу (картону, пластику, текстоліту, акрилу і т.ін.). Оптоприймач рахує кількість імпульсів за одиницю часу і за допомогою програмного забезпечення в мікроконтролері визначається швидкість обертання. Давач є трьох провідним – по двом провідникам подається живлення "+" та "-", по третьому провіднику проходить сигнал від оптичного приймача, "-" в даній схемі є спільним.

Принципова електрична схема розробленого експериментального стенду наведено на рис. 5.

Апаратна частина розробленого експериментального стенду складається з наступних принципових частин та компонентів:

- джерело живлення 110В, що надходить з лабораторного блоку живлення на клеми керівного модулю;
- колекторні МПС з НЗ;
- модуль керування;
- мікроконтролер «Arduino nano» з мікросхемою зв'язку з комп'ютером;
- блок живлення 12в 300 мА;
- провідники та клемники;
- стабілізатор напруги на 5 В з конденсаторами;
- резистивний подільник напруги для вимірювання;
- два силових польових транзистори 500 В 8,8А;
- два силових польових транзистори 200 В 30А;
- алюмінієвий радіатор з ізолюючими прокладками та гвинтами, на якому закріплені транзистори вентилятор для охолодження силових ключів;
- підтягуючі та обмежуючі резистори для транзисторів;
- датчики струму на ефекті Хола, що пропорційно перетворюють струм у напругу, що дозволяє виміряти її вбудованим АЦП мікроконтролера;

- RC фільтр нижніх частот. Необхідний, оскільки сигнали з датчиків струму не є неперервними, через те що силові ключі перемикаються з частотою 490 Гц;
- оптичний датчик на основі оптопари, що реагує на перешкоду, що заходить у його щілину. Дозволяє за допомогою вбудованого у мікроконтролер таймера вимірювати частоту обертів.

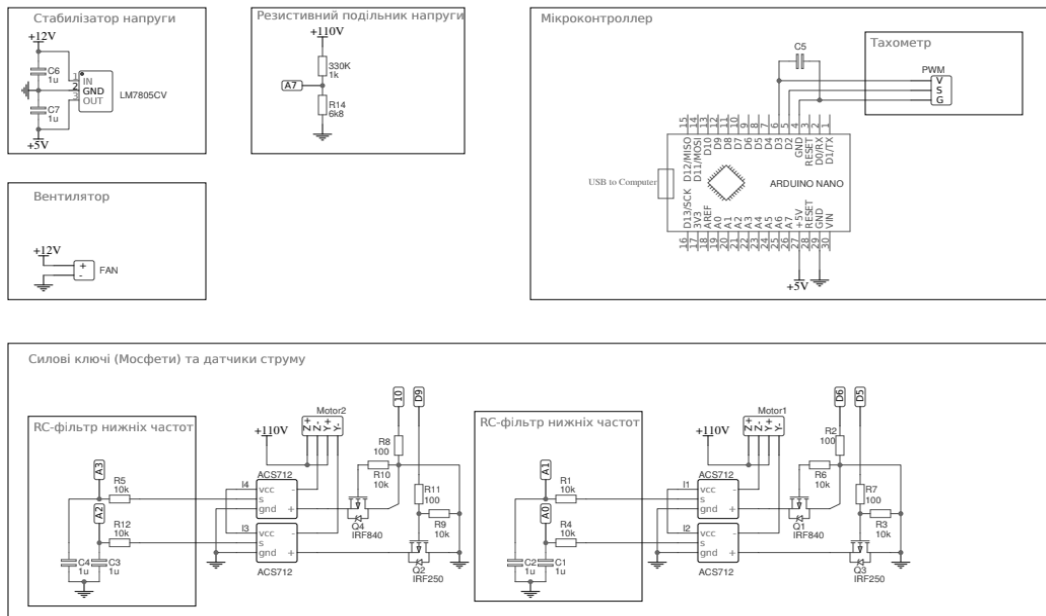


Рис. 5. Принципова схема розробленого стенду

Загальний вигляд змонтованого експериментального стенду показано на рис. 6.

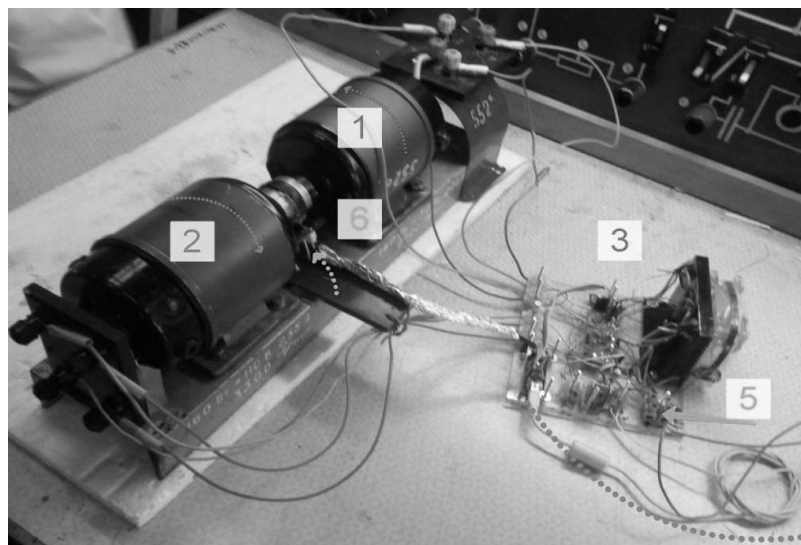


Рис. 6. Загальний вигляд експериментального стенду

На рис. 6. показано: 1, 2 – досліджувані МПС із незалежним збудженням, які вмикаються зустрічно в режимі двигуна та узгоджено в режимі роботи генератора. В режимі роботи генератора на обмотку якоря підключається реостат струмом 3 А, 50 Ом; 3 – апаратна частина, яка суміщає в собі мікроконтролер, силові ключі, давачі струму, напруги і т.ін.; 4 – панель живлення постійним струмом 110 В та джерело 220 В для блока живлення; 5 – входні термінали живлення стендом; 6 – оптичний давач швидкості; 7 – живлення мікроконтролера від автономного джерела;

До програмного забезпечення поставлені наступні вимоги: керування Мосфетами за допомогою ШІМ; зчитування показників датчиків, перерахунок значень; зчитування частоти обертів за допомогою переривань; комунікація з комп'ютером, отримання команд, вивід на екран показань; виконання поданих вище задач одночасно (Real-time). Всі вимоги були виконані за рахунок розробленої персонально та реалізованої в мікроконтролері авторської програми.

Розроблений експериментальний стенд здатен реалізовувати наступний функціонал за допомогою віртуального порту та програми Arduino ide (рис. 7): підключатися до комп'ютера, виводити данні на монітор, сприймати команди; одночасно керувати двома МПС з напругою живлення до 190В, струмом якоря до 5А, струмом збудження до 2А за допомогою ШІМ; плавно регулювати ШІМ з метою запобігання виходу з ладу; вимірювати середній струм, протікаючий через обмотки з точністю до 0.1А; вимірювати частоту обертів з точністю до ± 5 об/хв; вимірювати вхідну напругу до 190В; розраховувати подану середню напругу за даними заповнення ШІМ та вимірної вхідної напруги; показувати час у секундах, з моменту підключення до комп'ютера з точністю до $\frac{1}{2}$ секунди.

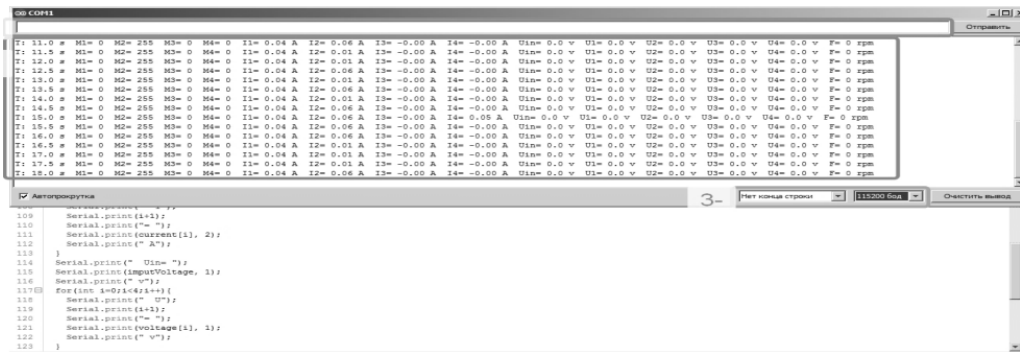


Рис. 7. Монітор послідовного порту для обробки та отримання результатів

Данні поділяються на стовпчики: час у секундах з моменту запуску, з точністю до $\frac{1}{2}$ секунди; 2 – стан ШІМу МОСФЕТів, де 0 – повністю закритий, 255 – повністю відкритий. МОСФЕТ 1-4; 3 – показники датчиків струму. Датчики струму мають точність близько 0.1 А; 4 – U_{in} – напруга на вході.

На рис. 8, для прикладу, показано розраховану характеристику $\eta=f(P_2)$ для досліджуваної МПС.

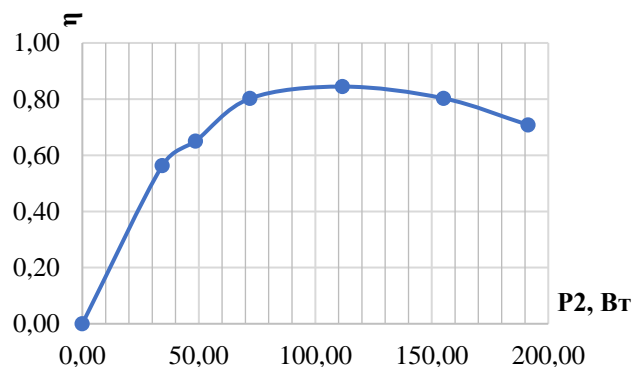


Рис. 8. Робоча характеристика досліджуваної МПС

Висновки В роботі розроблено експериментальний стенд для дослідження малопотужних машин постійного струму. Використовуючи мікроконтролеру техніку, сучасні силові ключі та вимірювальні давачі реалізовано авторське програмне забезпечення для керування досліджуваними електричними машинами та для реалізації будь-якої програми випробувань. Розроблений стенд можливо використовувати як в навчальному процесі для студентів напрямку енергетика так і для дослідницьких цілей. За рахунок використання сучасних компонентів вдалося суттєво знизити габаритні розміри стенду та підвищити його енергоефективність. За допомогою розробленого стенду успішно проведено випробування МПС та отримано відповідні характеристики.

Список використаної літератури

1. Свирский Е.А., Попов П.К. Испытание машин постоянного тока. №3. КУБУЧ.: Ленинград, 1927.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л., «Энергия», 1968.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007.
4. Коваленко М. А. Автономный экспериментальный стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк. // Електротехніка і електроенергетика. – 2015. – №2. – С. 15–20.

5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K.Ayyar, Dr.A.Nirmalkumar, Dr.G.Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010

6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, "Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique", International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122, 2009

7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Електронний ресурс] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

M. Kovalenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5602-2001

O. Samoylenko, Msc., **ORCID** 0000-0002-6540-8109

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DEVELOPMENT OF AN DEVICE FOR SMALL POWER DIRECT CURRENT MOTORS TESTING WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION

In this paper are presenting the results of practical development, dedicated to the development of an experimental device for the studying of the parameters and characteristics of low-power direct current motors. According to the results, a principal scheme for the testing of these machines based on the microcontroller was developed. Traditional methods for current and voltage measuring, rotation speed have been replaced by modern high-sensitivity sensors. Storing of testing parameters and characteristic's and its further post processing is performed on a semi-automatic mode with the help of personal computer. Also, software has been developed to implement the required test program: no load mode, short circuit mode, etc. This device can provide us to do different types of direct current motor mods: we can test it as motor mode as generator mode. It significantly increases its universality at small overall dimensions. The hardware of the experimental device is mobile, that is, with the help of one it is possible to provide testing of different motors which are situated in different places. As direct current regulators are use PWM which reduce the overall dimensions and increased the reliability of the experimental device due to the rejection of massive rheostats. With the help of its device are investigated some practical characteristics of small power direct current motor. These results are compare with theoretical results.

References

1. Svirsky E.A., Popov P.K. Direct current motors testing. No. 3. KUBUCH.: Leningrad, 1927.
2. Gervais G.K. Electrical machines industrial testing. L., "Energy", 1968.
3. Voldek A.I., Popov V.V. Electrical motors. Introduction to electromechanics. Direct current motors and transformers. St. Petersburg: Peter, 2007.
4. Kovalenko M. A. Autonomous experimental device for unipolar step motor testing which base on microcontroller / M. A. Kovalenko, D. S. Matsyuk. // Electrical engineering and power engineering. - 2015. - No. 2. - S. 15–20.
5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K. Ayyar, Dr. A. Nirmalkumar, Dr. G. Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010
6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, "Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique", International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122 , 2009
7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Electronic resource] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. - 2005. - Access mode to the resource: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

Надійшла 10.10.2019

Received 10.10.2019

Л.Н. Ширін, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1778-904X

І.В. Інюткін, асист., ORCID 0000-0002-6543-9909

А.Л. Ширін, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-0026-2767

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

М.І. Сергієнко, ORCID 0000-0001-8284-9072

Національний технічний університет України

«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ САМОХІДНОГО ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ

В даній статті дається експертна оцінка діючих методів контролю технічного стану самохідного вантажно-доставного обладнання імпортного виробництва, що експлуатується в реальних умовах гірничодобувної галузі. Визначення складових показника загальної ефективності самохідного обладнання. На підставі автоматизованого збору і обробки інформації про технічний стан колісних вантажно-доставних машин та експертної оцінки ресурсних показників вузлів і деталей по частоті виходу їх із ладу встановлено, що на даний час діагностування технічного стану самохідних гірничотранспортних машин імпортного виробництва є складним комплексним завданням, яке потребує розробки відповідних сучасних методів та вимірального обладнання з додатковим програмним забезпеченням.

Ключові слова: самохідне обладнання, технічний стан, експертна оцінка, діагностування, методи контролю, міра відмови, самохідна машина – гірниче середовище, технологічні параметри.

Вступ. В умовах сьогодення енергоємні промислові підприємства та потужні приватні компанії для виконання транспортно-технологічних процесів використовують сучасне самохідне вантажно-доставне і навантажувальне обладнання імпортного виробництва з дизельним приводом.

Область ефективного використання означених видів промислового транспорту найбільш поширена на гірничих та металургійних підприємствах де виконується великий обсяг основних та допоміжних транспортно-технологічних процесів. Дослідженнями потреб самохідного обладнання імпортного виробництва підприємствами гірничодобувних галузей показало, що найбільш затребуваними транспортно-технологічними машинами є вантажно-доставні машини (ВДМ) на пневмоколісному ходу, а також кар'єрні екскаватор-навантажувачі.

До переваг, найбільш поширених в Україні видів імпортного гірничотранспортного обладнання, фахівці відносять, перш за все їх високу мобільність, яка досягається завдяки застосування в конструкція машин надійних вузлів та агрегатів, таких як: двигуни – фірм Perkins, Deutz, Cummins; гідравлічні насоси – Parker, Danfos, Rexroth або Kawasaki; насоси високого тиску – Bosch або Delfi; трансмісії та мости – ZF, Saargo, Dana та ін. За рахунок такого компонування імпортне самохідне обладнання, порівняно з машинами вітчизняного виробництва, відзначається високою швидкістю виконання операцій та низькими витратами палива. В той же час, не зважаючи на високі адаптаційні здібності і продуктивність ВДМ та екскаватор-навантажувальних машин зарубіжного виробництва, у підприємств-споживачів імпортного самохідного обладнання постійно виникають проблеми з необхідністю заміни дефіцитних вузлів і агрегатів, що виходять з ладу в процесі експлуатації. Обумовлено це перш за все тим, що вагомий відсоток, придбаного фірмами імпортного гірничотранспортного обладнання, певний період часу експлуатувалось за кордоном в інших гірничо-геологічних умовах, з відповідною до тих умов комплектацію і має невизначений ресурс.

Аналіз досліджень і публікацій. Результати аналізу надійності вузлів і агрегатів імпортного самохідного обладнання в реальних умовах вітчизняних гірничих підприємств показали, що до основних причин виникнення аварійних ситуацій, перш за все, слід віднести: відсутність кваліфікаційного контролю і діагностики машин і механізмів; не дотримання експлуатаційних вимог і рекомендацій фірм виробників, а також несвочасні регулювання і змащування вузлів тертя та заміна фільтруючих елементів і мастил. Із-за подовжених термінів постачання та високих цін на запчастини і технічне обслуговування транспортного обладнання виробничі підприємства з великим парком однотипних машин вимушені утри-

© Л.Н. Ширін, І.В. Інюткін, А.Л. Ширін, М.І. Сергієнко, 2019

мувати на балансі більшу кількість самохідного імпортного обладнання для використання їх дефіцитних вузлів і агрегатів в якості запчастин.

Слід відзначити, що при експлуатації імпортного самохідного обладнання особливе значення приймає діагностичне забезпечення його технічного стану, яке включає в себе комплекс взаємопов'язаних правил, методів, алгоритмів і засобів, необхідних для безперерйного функціонування промислового об'єкта на всіх етапах життєвого циклу.

На даний час діагностування технічного стану самохідних гірничотранспортних машин імпортного виробництва є складним комплексним завданням, яке потребує розробки відповідних сучасних методів та вимірювального обладнання з додатковим програмним забезпеченням та використання нових конструктивних рішень.

Проведений аналіз досвіду експлуатації і діагностики самохідного обладнання на потужних гірничодобувних підприємствах зарубіжжя висвітив ідентичні проблеми. Так, в роботі [1] наведені висновки про стан парку гірничого обладнання на вугільних розрізах, де відзначається, що 4% екскаваторів, які використовуються при видобувних і розкривних роботах, знаходяться в доброму стані, 26% - в задовільному, 36% - в допустимому і 34% - в недопустимому стані. В методичних вказівках по проведенню експертизи промислової безпеки екскаваторів визначаються терміни, порядок, програма і методика проведення експертизи, а також наведені вимоги щодо норм і порядку проведення технічної діагностики з використанням методів контролю. Рекомендовані авторами програма і методика моніторингу дозволяють вести постійний контроль стану екскаватор-навантажувачів і забезпечує своєчасне виявлення дефектів, що зароджуються в процесі експлуатації обладнання та оцінювати ступень їх небезпеки. Але подібні заходи діагностики мають перспективу для потужних гірничих підприємств з великим парком самохідного обладнання де технічне обслуговування і ремонт виконують спеціалізовані автотранспортні підприємства, а заміна вузлів і деталей виконується за примусовим принципом, тобто відповідно з установленим графіком. В структурі ж підприємств з обмеженою кількістю самохідних ВДМ імпортного виробництва, відсутні спеціалізовані дільниці, оснащені сучасними комплектами обладнання для виконання діагностики, тому гірничотранспортне обладнання експлуатується до відказу, а його ремонт переважно проводиться самотужки на місцях. [2].

Мета роботи. Розробка програми і методики оперативного контролю технічного стану дизельних вантажно-доставних та навантажувальних машин для підвищення показників їх надійності і безаварійної роботи в складних умовах експлуатації. З метою покращення сервісу з технічного обслуговування і якості ремонту імпортного самохідного гірничотранспортного обладнання та зниження термінів і витрат на ліквідацію відказів було створено, в партнерстві з науково-виробничою компанією «Рінопарт», програму оперативного контролю та діагностування технічного стану дизельної вантажно-доставної машини.

Ідея роботи. В основу програми було покладено ідею автоматизованого збору і обробки інформації про технічний стан колісних вантажно-доставних машин імпортного виробництва для експертної оцінки ресурсних показників вузлів і деталей по частоті виходу їх із ладу. Згідно з програмою частота відказів вузлів і агрегатів самохідного обладнання встановлювалась по результатам обробки термінових заяв підприємств на поставку запчастин для їх ремонту.

Виклад матеріалу і результати досліджень. На етапі попередніх досліджень екскаватор-навантажувальна машина розглядалася виключно як технічна система, умовно розділена по функціональному призначенню на взаємодіючі підсистеми (вузли, агрегати). Для виявлення частоти

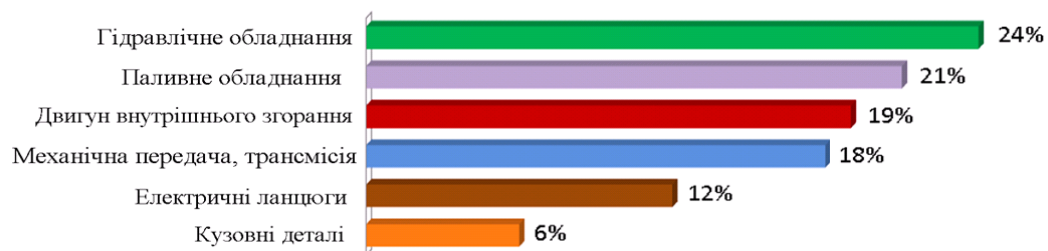


Рисунок 1 - Розподіл термінових заяв на запасні частини до самохідного обладнання

відказів вузли і агрегати самохідного ВДМ були згруповані по функціональному призначенню на кузовні частини, елементи механічної передачі, електричні мережі і апарати, системи обслуговування двигуна та вузли гідравлічної і паливної систем (рис. 1).

По результатам оцінки показників надійності вузлів і агрегатів самохідного гірничотранспортного обладнання встановлено, що найменше напрацювання на відказ у дизельного двигуна, механічної передачі та гідравлічної системи. Структура оцінки їх технічного стану і трудомісткість усунення відказів представлена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Структура оцінки технічного стану вузлів і агрегатів дизельного самохідного обладнання

Обл-ня	Система	Устаткування, агрегати, вузли	Види і категорії відмов	Головні причини виходу зі строю системи	Категорія та трудомісткість усунення відказу	
					Рівень	Чол/год
Двигун внутрішнього згорання	Кривошипно-пальний механізм	Блок циліндрів	Тріщина блоку	Перегрів двигуна, вібрація двигуна, невідповідне затягування болтів ГБЦ	V	16,0-24,0
		Гільзо-поршнева група	Немає компресії двигуна	Нерегулярне подання палива, попадання сторонніх часток	V	16,0-24,0
		Колінчастий вал	Відмови підшипників колінчатого валу	Зношування поверхонь тертя, порушення правил експлуатації двигуна, гідроудар	V	16,0-24,0
		Розподільний вал	Тріснув розподільний вал	Вироблення одного з ліжок, підвищена вібрація	V	16,0-24,0
	Охолодження та змащення	Водяна помпа	Витоки рідини, надмірна вібрація	Забруднення системи, ерозія крильчатки або корпусу помпи	L, M	3,0-8,0
		Термостат	Перегрівання двигуна	Перегрів, заклинювання,	L	1,0-2,0
		Радіатор	Протікання охолоджувальної рідини	Пошкодження радіатора, відключення датчика вентилятора, неякісна рідина	M	5,0-8,0
		Масляний насос	Зниження тиску в системі мастила	Знос або ушкодження корпусу вузла і його шестернями	M, V	8,0-14,0
	Живлення повітря та газопозоліп	Масляний радіатор	Порушена герметичність	Забруднення системи, механічне ушкодження	M, V	8,0-14,0
		Колектори, глушник	Зниження потужності, поганий запуск двигуна	Механічні ушкодження, корозія, прогорання складових частин, погане з'єднання елементів	M	8,0-10,0
		Повітряний фільтр	Перевитрати палива, зниження потужності	Неякісний фільтр, не вчасно проведене технічне обслуговування	L	0,5-1,0
	Паливне обладнання	Турбокомпресор	Ушкодження крильчаток, підшипник	Попадання в турбокомпресор сторонніх предметів, масляне голодування	M, V	8,0-14,0
		Живлення паливом	Насос підкачки палива	Порушення герметичності	Перегрівання, знос діафрагми, ущільнень	L
Паливний насос високого тиску			Заклинювання плунжера	Механічне ушкодження, попадання сторонніх часток	M, V	8,0-24,0
Форсунки			Вібрація при холостому ході, шум	Знос, некоректна установка, перегрівши	M	8,0-14,0
Паливний фільтр	Не запускається двигун, зупинка роботи		Неякісний фільтр, не вчасно проведене ТО	L	0,5-1,0	
Гідравлічне обладнання	Живлення гідравлічним мастилом	Гідравлічний радіатор	Протікання гідравлічної рідини	Неякісна охолоджувальна рідина, механічне ушкодження	M	8,0-14,0
		Розподільники	Заклинювання золотників, дефект корпусу	Попадання механічних часток, гідроудар, неякісна гідравлічна олія	V	16,0-24,0
		Гідравлічний насос	Заклинювання валу, знос плунжерів	Попадання механічних часток, вступ повітря, неякісна гідравлічна олія	V	16,0-24,0
		РВД	Протікання, порив рукавів	Механічна дія, гідравлічний удар	L, M	3,0-14,0
	Керування	Гідропідсилювач керма	Заклинювання золотників, протікання	Попадання в систему сторонніх часток, механічні ушкодження	M	8,0-14,0
		Гідроциліндр повороту	Не тримає тиску, течі олії, задираки штока	Попадання сторонніх часток в систему, механічні ушкодження	M	8,0-14,0

В процесі експертної оцінки термінових заяв на запасні частини встановлювались причини виходу із ладу основних вузлів, створювався банк даних про умови експлуатації самохідного обладнання та види і категорії відказів, описувались показники справного стану і нормального функціонування його вузлів і агрегатів, вивчалась історія виникнення і розвитку відказів

Встановлені таким чином типи і характеристики несправностей та трудомісткість їх усунення враховувались в подальшому при виборі раціональних методів і засобів технічної діагностики колісних видів кар'єрного і шахтного автотранспорту. Для підвищення ефективності запропонованої системи технічного обслуговування та діагностування самохідного вантажно-доставного обладнання характерні відкази вузлів і агрегатів екскаватор-навантажувальної машини були класифіковані по категоріям

складності їх усунення на легкі (L), середні (M) і важкі (V). В якості критеріїв оцінки складності було прийнято час усунення відказів і кількість працівників, що залучалась для їх відновлення. По результатам експертної оцінки режимів роботи вантажно-ого обладнання в реальних умовах експлуатації до категорії важких відказів були віднесені тривалі (більше 1 години) зупинки транспортно-технологічної системи, які потребують залучення допоміжних ресурсів і висококваліфікованих фахівців або більше двох робітників для їх ліквідації.

Накопичений банк даних про види і категорії відказів та їх кількісні показники надали змогу в подальшому визначати на якому саме рівні експлуатації самохідного вантажно-ого обладнання доцільно проводити профілактику вузла чи агрегату для попередження появ відказів їх складових елементів.

Для прогнозування поведінки заміненних вузлів і агрегатів програмою технічного обслуговування і діагностування діючого обладнання передбачається також отримання у замовника запасних частин додаткової інформації про нетипові умови експлуатації, які за висновками представників виробництва послужили причинами виникнення відказів.

Таким чином, використовуючи накопичений банк даних, принципи інженерної логістики, вживані в системі сервісного обслуговування, і галузеві методики вибору діагностичних параметрів для безперервних об'єктів, що представляються логічними моделями, можливо в процентному відношенні визначити міру відмови k_o ВДМ, який дорівнює:

$$k_o = \frac{\sum n_i}{N} 100\%; \quad (1)$$

де n_i - кількість відмов цього виду устаткування; N - кількість відмов усіх видів устаткування.

Відсоток відмов, отриманий по результатам оцінки статистичних даних, дозволив виявити найбільш ненадійні агрегати і системи обслуговуваного устаткування. До них відносяться системи живлення паливом ($k_o = 3,21$) і охолодження ($k_o = 5,25$); гідравлічна система ($k_o = 8,08$); механічна передача ($k_o = 6,68$).

Для самохідних ВДМ трудомісткість усунення відмов гідравлічного устаткування і механічної системи складає близько 30%, а кузовних частин і металоконструкцій більше 12%. Результати обробки статистичних даних дозволили сформувані для кожного агрегату і вузла ВДМ алгоритми пошуку характерних несправностей.

Одним із показників, що оцінюють надійність ВДМ нового покоління, слід рахувати коефіцієнти технічного використання k_{tv} , який дорівнює відношенню робочого часу самохідного обладнання до сумарного часу перебування його на об'єкті в працездатному стані з урахуванням часу на ремонт та проведення технічного обслуговування:

$$k_{tv} = \frac{t_r}{t_r + t_{sp} + t_{to}}; \quad (2)$$

де t_r – сумарне напрацювання ВДМ, хв;

t_{sp} – сумарний час простоїв через планові і позапланові ремонти, хв;

t_{to} – сумарний час планового технічного обслуговування, хв.

Також технологічне обладнання прийнято оцінювати показником загальної ефективності обладнання ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) k_{oee} , який оцінюють в залежності від доступності, ефективності та рівня якості роботи ВДМ:

$$k_{oee} = k_d * k_e * k_q \quad (3)$$

де k_d – доступність ВДМ, визначається як відношення різниці загального часу роботи ВДМ від простоїв та маневрових операції до загального часу роботи ВДМ;

k_e – ефективна робота ВДМ, визначається об'ємом перевезеної гірничої маси;

k_q – рівень якості роботи ВДМ, визначається відношенням різниці об'єму ковшу та об'ємом перевезеної гірничої маси за один цикл до об'єму ковшу.

В таблиці 2 наведені формули визначення складових показника загальної ефективності обладнання, які визначаються наступним чином:

Таблиця 2 – Складові показника загальної ефективності ВДМ

Доступність ВДМ	Ефективна робота ВДМ	Рівень якості роботи ВДМ
$k_d = \frac{t_r - t_k}{t_r} \quad (4)$	$k_e = \frac{t_c * V_{gm}}{t_r} \quad (5)$	$k_q = \frac{V_b - V_{gm}}{V_b} \quad (6)$

де t_k – сумарний час простоїв ВДМ, хв;

t_c – час циклу роботи ВДМ, хв;

V_{gm} – об'єм перевезеної гірничої маси за цикл, м³;

V_b – об'єм ковша ВДМ, м³.

Порівняльна оцінка експлуатаційних параметрів зарубіжного самохідного устаткування, вживаного на вітчизняних підприємствах, з показниками роботи аналогічних зразків за кордоном дозволила виявити ряд проблем, характерних для підприємств, які використовують високотехнологічне устаткування нового покоління. В процесі вивчення причин нестабільної роботи техніки нового покоління (ТНП), чинники, що визначають ті або інші проблеми, були систематизовані на технічні, технологічні і організаційні.

До основних організаційних чинників, що впливають на показники роботи гірничотранспортного устаткування зарубіжного виробництва, відносяться помилки з вини керівного персоналу. Наприклад, відсутність в учбових центрах гірничих підприємств і в системі професійно-технічної освіти програм спеціальної підготовки фахівців для вивчення сучасних методів діагностування і обслуговування техніки нового покоління, оснащеної автоматизованими системами управління транспортно-технологічними процесами.

Технічні чинники проявляються в результаті недотримання або порушення сучасних принципів діагностування і оперативного аналізу технічного стану гірничотранспортного устаткування високого технічного рівня в процесі інтенсивної його експлуатації. Приклад - технічні погрішності обслуговуючого персоналу, обумовлені експлуатацією гірничотранспортного устаткування в режимах, що не відповідають дійсним умовам шахтного середовища.

Технологічні чинники, визначаються особливостями експлуатації транспортного обладнання в гірничо-геологічних умовах конкретного підприємства, що постійно змінюються і корегуються за результатами кількісної оцінки адаптаційної здатності вживаного устаткування в типових, нетипових і екстремальних ситуаціях гірничого виробництва [3].

Слід відзначити, що сучасні ВДМ імпортних виробників мають програмні модулі або бортові комп'ютери на які поступає інформація та виводиться на монітор у вигляді коду-помилки. Крім того, заводом-виробником передбаченні прилади для діагностування технічного стану обладнання такі як: датчик тиску масла в двигуні; датчик температури масла в двигуні; датчик температури охолоджуючої рідини; датчик тиску коробки перемикачів передач; датчик рівня палива. Дані прилади виключають ймовірність поломки, наприклад в результаті перегріву двигуна, або виходу зі строю трансмісії за рахунок низького тиску масла під час роботи, що в свою чергу може привести до зносу фрикційних дисків зчеплення та гідротрансформатора.

Але при експлуатації самохідного вантажно-доставного обладнання в нетипових або екстремальних умовах діагностичні показники, які характеризують відкази вузлів або відхилення в штатних режимах роботи, необхідно підтверджувати експериментальними дослідженнями з використанням візуальних засобів діагностування, теоретичними розрахунками або результатами моделювання робітничих процесів. Обумовлено це тим, що деякі специфічні види і категорії відказів виражають тільки технічну складову і не віддзеркалюють вплив оточуючого середовища на ресурсні показники основних вузлів і деталей ВДМ машин та їх продуктивність.

Наприклад, згідно з діючими інструкціями, зчеплення коліс ВДМ з полотном шахтної дороги і стійкість машини при транспортуванні породи в підземних виробках досягають максимуму на дільницях траси з дорожнім покриттям при підтримці відповідного тиску в шинах. В складних гірничо-геологічних умовах, за відсутності дорожнього покриття, стійкість та швидкість машини, а відповідно і її продуктивність зменшуються при зниженні тиску в шинах. Експериментально встановлено, що в подібних умовах значно швидше зношуються задні колеса і боковини шин. Якщо ж тиск в шинах підвищений відзначається жорсткий хід машини, знижуються амортизаційна здатність конструкції, площа контакту шини з дорожнім полотном і як наслідок тягове зусилля. Останнє було підтверджено теоретичними розрахунками і послужило приводом для удосконалення традиційних методів технічного обслуговування та діагностики колісних ВДМ.

Шляхом використання сучасних засобів діагностування та методів моделювання умов взаємодії самохідного гірничотранспортного обладнання з дорожнім полотном були встановлені причини переважного зносу задніх коліс ВДМ при виконанні технологічних процесів завантаження ковша гірничою масою та переміщення машини порожняком і з вантажем. За результатами комплексного дослідження встановлено, що при переміщеннях порожньої ВДМ в виробках без покриття найбільші динамічні навантаження переважно приходяться на задню вісь, а при повному завантаженні ковша розподіляються рівномірно між осями. Відповідно, що за таких умов експлуатаційні показники зарубіжного самохідного устаткування, вживаного на вітчизняних підприємствах, не відповідають паспортним характеристикам.

Неоднозначний вплив гірничо-геологічних умов і рівня технічного їх обслуговування на експлуатаційні показники ВДМ визначив необхідність удосконалення діючої методики діагностування та прогнозування технічного стану самохідного імпортного обладнання. Згідно з цією методикою продуктивну роботу дизельних ВДМ в реальних умовах гірничого виробництва рекомендовано розглядати як взаємодіючу транспортно-технологічну систему «самохідна машина - гірниче середовище». Доцільність такого підходу обумовлено передусім функціональним призначенням самохідного гірничотранспортного

устаткування. На рис.2, на прикладі роботи вантажно-доставної машини, приведена структурна схема дослідження умов взаємодії базових вузлів між собою та з гірничим середовищем.

Згідно з комплексною методикою діагностування технічного стану ВДМ умови взаємодії транспортно-технологічної системи «самохідна машина - гірниче середовище» можна виразити через її продуктивність. Продуктивна робота дизельної вантажно-доставної машини розпочинається з зрушування

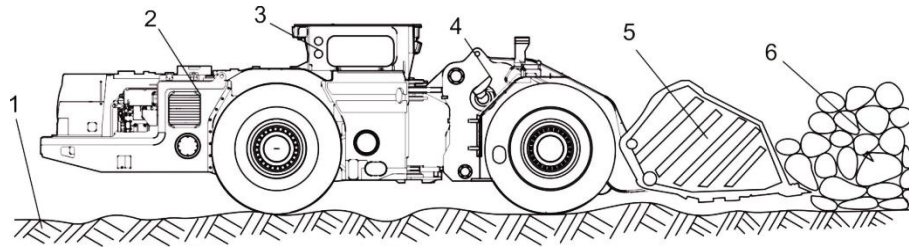


Рисунок 2 - Схема взаємодії транспортно-технологічної системи «вантажно-доставна машина – гірниче середовище»
1 – підшва виробки; 2 – задня напіврама ВДМ; 3 – кабіна ВДМ; 4 – передня напіврама ВДМ; 5 – ківш ВДМ; 6 – гірничі маси

машини з місця і її руху по дорожньому полотну. Гідромеханічна трансмісія імпортованих машин з автоматичним блокуванням дозволяє виконати швидкий перехід із стану спокою в стан руху, але на режим роботи її і двигуна впливатиме комплекс технічних і технологічних чинників, таких як: параметри маршруту переміщення, стан дорожнього полотна, метеорологічні умови та ін. Технічні чинники характеризують зміни енергії двигуна, яка через трансмісію передається провідним колесам. У свою чергу умови взаємодії коліс екскаватора-навантажувача з дорожнім полотном характеризуються фізико-механічними властивостями покриття і його станом, а також технологічними параметрами траси, такими як: продовжні і поперечні ухили, радіуси кривих, ширина дороги та ін. Приведені технічні і технологічні характеристики взаємодії шахтного самохідного устаткування з дорожнім полотном визначають опір руху машини, її продуктивність і витрати енергії на транспортування гірничої маси.

По результатам експериментальних досліджень встановлено, що в реальних умовах гірничого середовища ефективна робота самохідного обладнання в режимах завантаження і транспортування руди та при рухах на підйом або гальмуванні на схилах забезпечується стійкою роботою двигуна, яка витрачається на подолання сил опору руху машини і на досягнення розрахункових показників швидкості v і часу руху завантаженої t_r та порожньої t_n машини на кожній ділянці маршруту. При цьому тягове зусилля на окружності коліс (F_k) в кожен момент дорівнює сумі сил опору (W):

$$F_k = W_o \pm W_i + W_b \pm W_j = W \quad (7)$$

де W_o – сили опору руху коліс по полотну дороги, $H/\kappa H$;

W_i – сили опору руху від ухилу дороги $H/\kappa H$;

W_b – сили опору повітря (за або проти вентиляційного потоку) $H/\kappa H$;

W_j – сили опору при зміні швидкості машини (розгін, уповільнення) $H/\kappa H$.

Відповідно до рекомендацій [4] рівняння руху може бути переписано як:

$$F_k - W_b = W_o \pm W_i + W_j = G(w \pm i \pm j) \quad (8)$$

або

$$\frac{F_k - W_b}{G} = w \pm i \pm j = D \quad (9)$$

де w – питомі ходові опори ВДМ $H/\kappa H$;

i – ухил транспортних виробок %;

j – прискорення (+) або уповільнення (-) руху машини, m/c^2 ;

D – динамічний чинник виражений питомими опорними руху, %.

Слід відзначити, що процеси транспортування гірничої маси в технологічних схемах видобутку руди підземним способом складають близько 30%, а на відкритих роботах досягають 60%. З урахуванням діючих в галузі рекомендацій витрати на транспортування гірничої маси та експлуатаційні розрахунки швидкості і часу руху навантаженої ВДМ виконувалися послідовно для усіх ділянок траси від вибою до рудоспуску і порожняком у зворотному напрямі [5].

Експериментально доведено, що понизити транспортні витрати можливо шляхом покращення умов взаємодії транспортно-технологічної системи «самохідна машина – гірниче середовище», тобто за рахунок

створення умов експлуатації транспортного обладнання, які максимально відповідають раціональним параметрам машини, або шляхом підвищення довговічності та безвідмовності машин в реальних умовах гірничого середовища.

Аналізуючи данні термінових заяв на поставку запасних частин (рис. 1) та результати експертної оцінки експлуатаційних показників ВДМ [6] встановлено, що в складних гірничо-геологічних умовах до вузлів і агрегатів з найбільш низькою надійністю відносяться гідравлічна та паливна система (понад 45%). Слід відзначити, що в інструкціях по експлуатації ВДМ додається регламент проведення технічного обслуговування, згідно якого через кожні 200-250 мотогодин потрібно проводити заміну паливних фільтруючих елементів, а фільтри гідросистеми через 500-1000 мотогодин. У зв'язку з цим діагностування технічного стану паливної системи ВДМ проводилося методом заміру тиску.

Відповідно до інструкцій щодо проведення планового технічного обслуговування та ремонту ВДМ, експериментально отримані заміри тиску перевірялися на спеціальному стенді сервісного спеціалізованого центру з використанням витратоміру потоку (рис. 3).



Рисунок 3 – Стенд для експериментальних досліджень експлуатаційних параметрів паливного насоса високого тиску

До основних несправностей, які були спричинені недоброякісним паливом були віднесені - заклинювання плунжера паливного насоса високого тиску та вкраплення прецизійного шару плунжерної шайби (рис. 4).



Рисунок 4 – Характерні пошкодження плунжерної шайби паливного насоса високого тиску

По результатам експертної оцінки ресурсних показників вузлів і агрегатів імпортованих ВДМ, вживаних на вітчизняних підприємствах, можна констатувати, що в складних умовах гірничого виробництва для визначення їх технічного стану, необхідно розглядати їх функціонування як взаємодіючу транспортно-технологічну систему «самохідна машина - гірниче середовище». При цьому, характеристики технічного стану ВДМ, отримані традиційними засобами діагностики, бажано підтверджувати результатами експериментальних досліджень та теоретичними розрахунками. Експериментально доведено, що використання результатів експертної оцінки та комплексних досліджень забезпечує оперативне виявлення критеріїв оцінки граничного стану вузлів і агрегатів ВДМ з урахуванням впливу гірничого середовища і відповідно формує базу для удосконалення діючих в галузі методик діагностування та прогнозування технічного стану гірничотранспортного самохідного обладнання.

Висновки. Результати експериментальних і теоретичних досліджень параметрів взаємодії транспортно-технологічної системи «самохідна машина - гірниче середовище» та стендових випробувань вузлів вантажно-доставних машин і екскаватор-навантажувачів дозволили констатувати, що переважна більшість простоїв самохідного обладнання із-за відмов обладнання можливо попередити шляхом

удосконалення системи технічного його обслуговування та діагностування. Багаточисельні відмови вузлів і агрегатів перш за все обумовлені відсутністю на гірничих підприємствах схем моніторингу, які б дозволяли вести оперативний контроль стану самохідного імпортного обладнання. У цьому зв'язку, отриманий банк даних про причини відмов вузлів і агрегатів, можна вважати основою для розробки методичних вказівок по проведенню контролю і експертизи технічного стану ВДМ в реальних умовах гірничого виробництва.

Для забезпечення своєчасного виявлення дефектів, які зароджуються на рівні елемента, вузла чи агрегату в методичних вказівках повинні бути чітко прописані:

- вимоги щодо норм і порядку проведення контролю експлуатаційних параметрів ВДМ з використанням сучасних засобів технічного діагностування;
- приклади вірогідних дефектів при експлуатації в нетипових умовах;
- критерії оцінки граничного стану та залишкового ресурсу базових вузлів ВДМ.

Передбачено також, що сформований банк даних про характерні відмови та методика оперативного виявлення дефектів і категорій складності їх усунення послужить в подальшому основою для формування нормативно-методичної бази щодо розробки експертної системи діагностування технічного стану вантажно-доставних машин імпортного виробництва.

Список використаної літератури

1. Герике П.Б. Новое в методике проведения испытаний энерго-механического оборудования горной техники / Вестник Кузбасского государственного технического университета. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2017. № 3. С. 126-133.

2. К.Р.Монсини Фирма «Катерпиллар» – концепция технического обслуживания горных машин// Горный журнал, – 1998. – № 11-12, С. 66-69.

3. Ширін Л.Н, Інюткін І.В. «Особенности формирования транспортно- технологических систем подземных рудников с учетом адаптационных возможностей самоходного оборудования// Науковий вісник – 2009. – №9. –С. 66 –68.

4. Транспорт на гірничих підприємствах: Підручник для вузів. – 3-є вид./ Авт. доповнень, змін та корегування: М.Я. Біліченко, Г.Г. Півняк, О.О. Ренгевич, О.В. Денищенко та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 636 с.

5. Ширин А.Л. Транспортные проблемы производительной работы подготовительных забоев и перспективы их решения / А.Л. Ширин, Л.Н. Посулько, В.А. Расцветаев // Materiały Krakowskiej konferencji młodych uczonych. – Kraków: PATRIA, 2011. – P. 505 – 512.

6. Artem Shyrin. Informatywne wskaźniki niezawodności pracy schematów technologicznych transportu wspomagającego podczas drażenia wyrobisk przygotowawczych// Conference proceedings Krakow conference of young scientists, September 26–28, 2013, Grupa Naukowa Pro Futuro, Krakow: PATRIA. P. 83–87.

УДК 622.063.88

Л.Н. Ширин, д-р. техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-1778-904X**

И.В. Инюткин, асист., **ORCID 0000-0002-6543-9909**

А.Л. Ширин, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0003-0026-2767**

Национальный технический университет

«Днепропетровская политехника»

М.И. Сергиенко, **ORCID 0000-0001-8284-9072**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ САМОХОДНОГО ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В данной статье дается оценка действующих методов контроля технического состояния самоходного погрузочно-доставочного оборудования импортного производства, которое эксплуатируется в реальных условиях горнодобывающей промышленности. Определены составляющие показателя общей эффективности самоходного оборудования. На основании автоматизированного сбора и обработки информации о техническом состоянии колесных погрузочно-доставочных машин и экспертной оценки ресурсных показателей узлов и деталей по частоте их выхода из строя установлено, что в настоящее время диагностирование технического состояния самоходного горнотранспортного оборудования импортного производства является сложной комплексной задачей, требующей разработку

соответствующих современных методов и измерительного оборудования с дополнительным программным обеспечением.

Ключевые слова: самоходное оборудование, техническое состояние, экспертная оценка, методы контроля, диагностика, степень отказа, самоходная машина - горная среда, технологические параметры.

L. Shyrin, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1778-904X

I. Inyutkin, асист., ORCID 0000-0002-6543-9909

A. Shyrin, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-0026-2767

Dnipro University of Technology

M. Sergiienko, ORCID 0000-0001-8284-9072

**National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

IMPROVING METHODS FOR MONITORING AND DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF SELF-PROPELLED TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF MINING ENTERPRISES

This article evaluates the current methods for monitoring the technical condition of imported self-propelled loading and delivery equipment, which is operated in real conditions of the mining industry. Comparative assessment of the performance of foreign self-propelled equipment should be evaluated by the indicator of Overall Equipment Effectiveness (OEE), which is evaluated depending on the availability, efficiency and quality of work of the LHD.

The results of experimental and theoretical studies of the parameters of the interaction of the transport-technological system "self-propelled machine - mining environment" and bench tests of LHD parts allowed to state that the vast majority of downtime of self-propelled equipment due to equipment failures can be prevented by improving its system of maintenance and diagnosis. The components of the indicator of the overall effectiveness of self-propelled equipment are determined.

Numerous failures of systems and parts are primarily due to the absence of monitoring schemes at mining enterprises that would allow operational control of the condition of self-propelled imported equipment. In this regard, it is necessary to obtain a database of the causes of failures of systems and parts, which can be considered as the basis for the development of methodological guidelines for the control and testing of the technical conditions of the LHD in real mining conditions.

Based on the automated collection and processing of information about the technical condition of LHD and expert assessment of the resource indicators of units and parts according to the frequency of their failure, it has been established that currently diagnosing the technical condition of foreign-made self-propelled mining transport equipment is a complex integrated task requiring the development of relevant modern methods and measuring equipment with additional software.

Keywords: *self-propelled equipment, technical condition, overall equipment effectiveness (OEE), expert evaluation, diagnostics, control methods, failure rate, self-propelled machine - mining environment, technological parameters.*

References

1. Gerike P.B. New in the test methodology for energy-mechanical equipment of mining equipment / Bulletin of the Kuzbass State Technical University. Kemerovo: Publishing house of KuzGTU, 2017. No. 3. P. 126-133.
2. K.R. Monsini Firm "Caterpillar" - the concept of maintenance of mining machines // Mining Journal, - 1998. - No. 11-12, S. 66-69.
3. Shirin L.N., Inyutkin I.V. "Features of the formation of transport and technological systems of underground mines, taking into account the adaptive capabilities of self-propelled equipment // Naukovy visnik - 2009. - No. 9. - FROM. 66-68.
4. Transport at mining enterprises: Textbook for universities. - 3rd edition / Ed. additions, changes and adjustments: M.Y. Bilichenko, G.G. Pivnyak, O.O. Rengevich, O.V. Denischenko and others. - Dnepropetrovsk: National Mining University, 2005. - 636 p.
5. Shirin A.L. Transport problems of the productive work of preparatory faces and prospects for their solution / A.L. Shirin, L.N. Posunko, V.A. Rasvetsaev // Materiały Krakowskiej konferencji młodych uczonych. - Kraków: PATRIA, 2011.-- P. 505 - 512.

6. Artem Shyrin. Informatywne wskaźniki niezawodności pracy schematów technologicznych transportu wspomagającego podczas drażenia wyrobisk przygotowawczych // Conference proceedings Krakow conference of young scientists, September 26–28, 2013, Grupa Naukowa Pro Futuro, Krakow PAT. P. 83–87.

Надійшла 22.10.2019
Received 22.10.2019

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 614.8

О.А. Крюковська, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-3554-7204
Є.Е. Литвинова, магістр, ORCID 0000-0002-1915-3459
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ У ВИРОБНИЦТВІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ ТА ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГІДНИХ СМОЛ

У статті розглянуті небезпеки, які можуть виникнути при виготовленні й перероблюванні у виробі композиційних матеріалів. Актуальність теми пов'язана із тим, що сучасна індустрія вже не може обмежуватись використанням традиційних матеріалів. Їх змінюють сучасні матеріали - композити, які широко застосовуються майже у всіх галузях промисловості. Задля отримання покращених властивостей композитів до їх складу додаються різноманітні домішки. Це дозволяє досягти кращих експлуатаційних властивостей матеріалів. Домішки, мономери та самі композити під час їх використання можуть чинити негативного впливу на організм людини. Зокрема, при виготовленні композиційних матеріалів можливе застосування або виділення у процесі переробки речовин, які є токсичними, що призводить до отруєнь. Як при виробництві композитів, так і при їх переробці у готові вироби в повітрі робочого приміщення утворюються різноманітні шкідливі газоподібні речовини і пил, що призводить до розвитку негативних змін в організмі робітників. Задля того, щоб уникнути виробничого травматизму, шкідливого впливу на здоров'я й професійної захворюваності, необхідно дотримуватись технології виробництва композитів та заходів безпеки, які розглянуті у цій статті.

Ключові слова: композити, епоксидні смоли, фенолформальдегідні смоли, небезпеки, заходи безпеки

Вступ. Сучасна індустрія висуває досить високі вимоги до матеріалів, використовуваних у промисловості. Традиційні матеріали, такі як метали, деревина, кераміка вже не відповідають даним критеріям. Тому виникає необхідність у виробництві та використанні у промисловості нових матеріалів, які володіють всім необхідним заданим комплексом властивостей. Такими матеріалами є композити. Вони широко застосовуються у таких галузях промисловості, як машинобудування, суднобудування, деревообробна промисловість, ткацьке виробництво, будівництво. З них виготовляють велику кількість різноманітних виробів. Наприклад, деталі електро- й радіотехніки, друковані плати, вироби для побуту, предмети галантереї, лаки, фарби, просочення, ливарні та просочувальні компаунди, електроізоляційні покриття високоміцних конструкційних виробів. Вони також можуть застосовуватися у якості теплозахисних, теплоізоляційних матеріалів у виробництвах загальнотехнічного призначення.

Одним із перспективних напрямків у виробництві композитів вважається виготовлення матеріалів на основі епоксидних і фенолформальдегідних смол.

Епоксидні смоли мають виняткові властивості та широкого застосовуються у стоматології: на їх основі виготовляють матеріали для пломбування зубів, кореневих каналів. Окрім цього, з них виготовляють різноманітні клеї, пластмаси, електроізоляційні лаки, текстоліт (скло- та вуглепластики), заливальні компаунди й пластоцементи.

Фенолформальдегідні смоли можуть бути використані у якості в'язучих для одержання фенолформальдегідного пластику (фенопласту), термоізоляційних матеріалів, деревних пластиків. Основні види фенопластів - прес-матеріали, шаруваті пластики, склопластики, пінопласти.

Найбільше застосування отримали фенопласти, які містять, окрім смоли, наповнювачі, отверджувачі, змашувачі та барвники [1].

Домішки, що додаються до основного компонента (мономера) дозволяють досягти покращення експлуатаційних, трибологічних та фізико-механічних характеристик матеріалу. Однак, не зважаючи на те, що застосовуючи ці речовини можна отримати вироби з найкращими властивостями, при виготовленні композитів та перероблюванні їх, вони здатні негативно впливати на стан здоров'я людини.

Зважаючи на вищезазначене, метою даної роботи є аналіз шкідливого впливу на організм людини технології виробництва композиційних матеріалів на основі фенолформальдегідних та епоксидних смол

© О.А. Крюковська, Є.Е. Литвинова, 2019

при виготовленні цих виробів й попередження травматизму та професійної захворюваності.

Небезпеки при роботі з епоксидними смолами. Не зважаючи на те, що композити широко застосовуються у промисловості, виготовлення даних матеріалів є небезпечним, оскільки у процесі їх виробництва можуть виділятися шкідливі, токсичні та високобіологічно агресивні речовини, які несприятливо впливають на організм людини й стан її здоров'я. Поряд із загальною токсичною дією ці речовини надають дратівливої й припікаючої дії на шкіру та слизові оболонки. Вони також є високоактивними алергенами.

Епоксидні смоли (епон) отримуються шляхом конденсації епіхлоргідрини зі спиртами чи фенолами. Для тих смол, що в твердому стані, використовуються різноманітні домішки та стверджувачі (поліетиленполіамін, гексаметилендіамін, діізоціанати). Під час виробництва епоксидних смол в повітря робочої зони потрапляють їх окремі складові (епіхлоргідрин та деякі стверджувачі), які надають дратівливої, токсичної, сенсibiliзуючої дії людині через те, що у них є реакційно-активні епо- й гідроксильні групи.

Високі концентрації епіхлоргідрину уражають слизову оболонку дихальних шляхів. У випадку важких інтоксикацій у працівника може виникнути набряк легень. Попадаючи на шкіру, він викликає буллезний дерматит. При хронічному отруєнні подразнюються легені й очі, з'являються головні болі, підвищена стомлюваність, диспепсичні явища.

Окрім цього, можуть з'явитися набряки очей, кон'юнктивіти, катаральний стан легень, функціональні розлади нервової системи із явищами вегетативної дисфункції. Розвиваються гепатит, хронічний холецистит, гастрит, коліт.

На відкритих ділянках тіла проявляються різні захворювання шкіри, як від прямого контакту епоксидної смоли зі шкірою й іншими складниками, так і від впливу пилу й летких речовин [1].

При виробництві епоксидних смол у працівників досить часто виникають дерматити й екзема, рідше – алергічна риносинусопатія, обструктивний бронхіт й бронхіальна астма, шкірні патології. Найчастіше уражуються відкриті ділянки тіла (руки та обличчя). При використанні смол на основі складних ефірів гліцидінових заміщених карбонових кислот можливі стійкі фотодерматити. Також у працівників можуть з'являтися захворювання органів дихання (гіпертрофічні, субатрофічні й атрофічні риніти та ринофарингіти, хронічні обструктивні бронхіти й бронхіальна астма). Зі збільшенням професійного стажу зростає кількість захворювань верхніх дихальних шляхів і хронічних бронхітів, у робітників зі стажем до 1 року може виникати бронхіальна астма.

Окрім уражень шкіри й органної патології, які можуть розвиватися в осіб, що контактують із епоксидними смолами, нерідко виникають функціональні порушення центральної нервової системи: вегетативна дистонія й астеновегетативний синдром.

Епоксидні смоли часто змішуються зі стверджувачами: амінами, ангідридами карбонових кислот, дифенолом й іншими сполуками, які самі характеризуються сенсibiliзуючими властивостями й, спричиняють розвиток алергічних дерматитів та екзем у робітників. Таким стверджувачем, як фталевий та малеїновий ангідриди притаманна подразнююча дія на шкіру, очі й верхні дихальні шляхи. До розвитку вегетативної дисфункції може призводити тривалий контакт із фталевим ангідридом [2].

Небезпеки при роботі з фенолформальдегідними смолами та виготовленням виробів з них. Фенолформальдегідні смоли є продуктами поліконденсації фенолів із формальдегідом. Їх отримують при взаємодії фенолу (рідше – крезолу, резорцину, аніліну, толуїдину, м-фенілендіаміну) з формальдегідом або іншими альдегідами, у присутності каталізатора.

При виготовленні виробів виділяються пил фенолформальдегідних смол, прес-порошків та готових пластмас, які чинять несприятливу дію на людину.

Через виражену алергізуючу дію формальдегіду в працівників з'являються дерматити й екзема, ураження органів дихання (риніти, фарингіти, астматичний бронхіт, бронхіальна астма). Інколи в працівників можлива поява диспепсичних явищ, помірного збільшення печінки із незначним порушенням її функцій. У частини працівників може розвиватися астеновегетативний синдром із судинними реакціями.

Від пилу прес-порошків, який утворюється під час вторинної механічної обробки полімерів, є можливим розвиток пневмокониозу.

За термічної обробки фенопластів можуть виділятися: фенол, аміак, альдегіди, чадний газ й інші небезпечні для людини речовини [2].

Аміак є безбарвним газом з їдкими запахом та смаком. При високому вмісті викликає сильну сльозотечу та болі очей, задуху, сильний кашель, біль у шлунку, блювоту. При важкому отруєнні збільшується печінка, різко зменшується легенева вентиляція, можуть бути опіки очей. Як наслідок, мутні кристалики, може статись прорив роговиці ока та втрата зору; хрипне чи зникає голос, з'являються хронічні бронхіти; може активуватись туберкульозний процес. При малих концентраціях – набрякають очі, можуть бути головні болі та болі у грудях. При хронічному отруєнні з'являються неврастенія, знижується біоелектрична активність головного мозку, знижується рівень вітаміну С в крові. Підвищена захворюваність тонзилітом, відбуваються зміни в жировому й білковому обмінах.

Оксид Карбону (чадний газ) – безкольоровий газ без смаку і запаху. Під час вдихання невеликих концентрацій відчувається важкість, відчуття здавлення голови, головний біль, шум у вухах, почервоніння шкірних покривів, слабкість, спрага, збільшення частоти пульсу, нудота, блювота. Найбільше при отруєнні страждає центральна нервова система.

При хронічному отруєнні з'являються шум в голові й головні болі, особливо вранці, запаморочення, відчуття чаду, схуднення, підвищена стомлюваність, послаблення пам'яті й уваги, відсутність апетиту, безсоння вночі та сонливість вдень, сіруватий колір шкіри, нав'язливий страх, задишка, серцебиття, пітливість. Після одноразового та повторних отруєнь вагітних жінок плід може загинути, навіть якщо мати перенесла отруєння без видимих для неї наслідків.

При вдиханні парів альдегідів виникають дерматити, кон'юнктивіт, подразнюються слизові оболонки очей; у важких випадках набрякають голосові зв'язки й легені, можлива поява синуситів, астми, ціанозу та пневмонії. З'являється роздратування, а через короткий проміжок часу можливі втрата свідомості та летальний випадок.

При вдиханні парів метальдегіду спостерігаються сомноленція, розлади координації, запаморочення, нудота, судоми.

Після потрапляння всередину формаліну з'являються опіки на слизових оболонках рота, стравоходу, верхнього відділу шлунково-кишкового тракту; виникають інтенсивні болі в області уражених слизових оболонок, блювання (можливо з кров'ю), діарея та тенезми; у важких випадках – оглушення, затьмарення і втрата свідомості [3].

Окрім цього, можливі, інгаляційні отруєння фенолом. У людини визначається блідість, інтенсивне потовиділення, занепокоєння, посилена рухова активність. При огляді виявляється генералізований ціаноз, включення у процес дихання допоміжної мускулатури, гіперемія видимих слизових, можуть бути скарги на гострий головний біль, запаморочення, порушення координації, відчуття задухи. У важких випадках можливий розвиток коми та рефлекторної зупинки дихання.

Отруєння фенолом через шкірні покриви супроводжується появою хімічних опіків. У місці контакту шкіри з токсикантом виникає зморшкуватість, блідість, а з плином часу злущування, з'являються скарги на відчуття печіння, поколювання, оніміння пошкодженої ділянки. Розвивається короточасне підвищення температури тіла, гіперкінези, зміни в роботі серця і дихальної системи.

При хронічній інтоксикації виникає ранкова нудота, пітливість, зниження м'язового тону, нестабільність психіки, дратівливість, безсоння, інколи присутній свербіж шкіри, слинотеча, сухий кашель, особливо виражений протягом робочого дня. Іноді відзначається розвиток анемії, болю в надчеревній ділянці, задишка і почуття серцебиття.

Токсичну дію надають резольні фенопласти – бакеліти, а також немодифіковані фенолоформальдегідні смоли, що містять великі кількості вільного фенолу (крезолу) і формальдегіду. Шкірні захворювання, як правило, виникають при роботі з фенолоформальдегідною баритовою смолою (клей ВІАМ Б-3). На різних ділянках тіла можуть з'являтися свербіж, потім набряклість і мокнучі бульбашки, через 2–3 дні ці явища поступово зникають, але іноді ураження шкіри може супроводжуватися ускладненнями – появою імпетиго, гнійничкових захворювань і фолікулітів. Викликають дерматити, екземи рук і обличчя (які можуть поширюватися на все тіло) лаки, які виготовлені з бакеліту А.

Велика кількість дерматитів відбувається в деревообробній промисловості при використанні смол МФ-17; при використанні термореактивного пресового волокнистого матеріалу на основі фенолформальдегідних смол і скловолокна або стеклоліту (пресовий матеріал АГ-4) і склотекстоліти СКМ-1. Вдихання пилу, що утворюється при різанні і поліровці бакеліту С або при роботі з бакелітовою смолою, призводить до загальної втоми, головного болю, подразнення слизових дихальних шляхів, астмоїдного бронхіту та захворювання шкіри; відомі випадки захворювання нирок.

Процес приготування фольгованого гетинаксу характеризується забрудненням повітря фенолом і ацетоном. У працівників виявлені зміни з боку нервової і серцево-судинної систем. У робітників, які працюють на гарячому пресуванні, виникали захворювання верхніх дихальних шляхів, ознаки вегетодистонії і астенії, захворювання шлунково-кишкового тракту, особливо при виробництві прес-порошків.

У виробництві теплоізоляційних плит ФС-7 на основі фенолформальдегідної смоли із стверджувачем уротропіном у працівників з'являються фарингіти, риніти, ринофарингіти; скарги на диспептичні розлади, які нарастають зі стажем, а також на дизуричні явища; функціональні розлади нервової системи [1].

У виробництві склопластиків, а також при їх застосуванні повітряне середовище забруднюється летючими речовинами, пилом склопластику. Крім того, при ряді операцій мають місце постійний контакт і забруднення шкірних покривів сполучними й іншими речовинами.

У робітників виробництва склопластиків на основі фенолформальдегідної та епоксидної смол відзначена патологія, властива впливу цих смол: ознаки ураження центральної та вегетативної нервової систем, серцево-судинної системи, шлунково-кишкового тракту. Часто зустрічаються професійні дерматози через дратівливу та сенсibiliзуючу дію багатьох інгредієнтів склопластиків, а також травмування шкірних

покривів скловолокном. Характерні дрібновузлові яскраво-червоні висипання на зовнішній частині кистей, передпліч, у згинах та складках шкіри. Поширені ураження нігтів (тьмяність, відшарування) [2].

Таким чином, при виробництві композиційних матеріалів на основі епоксидних та фенолформальдегідних смол у повітря робочої зони виділяються різноманітні за природою впливу газоподібні сполуки та пил, які здатні спровокувати розвиток різних патологічних змін у працівників залежно від їх кількості й протяжності впливу. Такі зміни можуть бути як незначними, так і призводити до тяжких захворювань, прояв яких залежить від концентрації небезпечних речовин та тривалості їх впливу на людину.

Заходи безпеки. Зважаючи на всі небезпеки, з якими можуть стикатися працівники при виробництві композиційних матеріалів на основі епоксидних та фенолформальдегідних смол, слід мінімізувати шкідливий вплив небезпечних речовин, з якими можуть контактувати робітники та вирішити проблеми безпеки життєдіяльності. Цього можна досягти шляхом забезпечення зручних умов діяльності людей, захисту людей та навколишнього середовища від впливу небезпечних факторів, що перевищують нормативно-допустимий рівень. У першу чергу, рекомендовано проводити заходи санітарно-гігієнічного плану. Вони передбачають: підтримування температурного режиму і режиму вологості [4]; наявність справної вентиляції; наявність постійного контролю вмісту пилу, який утворюється у робочій зоні, передусім у приміщеннях із поганою провітрюваністю; проведення очищення робочої зони для того, щоб уникнути запиленості, яка може утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям та приводити до миттєвого вибуху [5]; перевірку справності обладнання (теплоізоляцію та герметичність); здійснення герметизації апаратів і комунікацій; безперервність й автоматизацію технологічного процесу; максимальне зменшення кількості фенолу та формальдегіду у смолах, композиціях, клеях, пластиках та виробих з них.

Оскільки, на підприємствах, що займаються виготовленням композиційних матеріалів, є обов'язковим проведення контролю якості виробленої продукції, то для цього використовують методи рентгеноструктурного аналізу, які здійснюються на рентгенівських апаратах. Ці дослідження є небезпечними для організму людини, тому, для того щоб мінімізувати їх негативний вплив при їх виконанні, важливо дотримуватись правил радіаційної безпеки праці:

- дослідження повинні проводитися тільки у спеціально обладнаних для цього приміщеннях, пристрої та обслуговування яких відповідає санітарно-технічним вимогам;
- повинен бути постійний контроль за рівнем іонізуючого випромінювання, озону, окислів азоту, які виникають при іонізації рентгенівського випромінювання;
- не допущення відхилень від встановленого технологічного процесу роботи з джерелом іонізуючого випромінювання;
- використання спецодягу (бавовняний халат ДСТУ 12.4.131-83 та ДСТУ 12.4.132-83, бавовняна шапочка, діелектричний килимок)
- перед початком роботи необхідно переконатись у справності блокувальних пристроїв, вимірювальних приладів, систем вентиляції, електропостачання;
- переконатись у наявності та справності захисних екранів, блокувань;
- необхідно контролювати потужність дози випромінювання у приміщеннях, де проводяться дослідження, технічний стан та ефективність засобів захисту від радіації, який включає контроль за потужністю випромінювання на поверхні установок в усіх доступних точках й на робочому місці працівників [6].

Важливим є виконання працівниками заходів особистої гігієни, використання засобів індивідуального захисту. При контакті з речовинами, які надають сенсibilізуючої та подразнюючої дії на шкіру, необхідно застосовувати [7]:

- рукавиці: гумові, технічні (К 20 Щ 20 по ДСТУ 20010-74), пластикові на текстильній основі (типу "Тепласт" червоного кольору);
- креми, захисні мазі та пасти: ХІОТ-6, мазь Міколан, паста ІЕР-1, казеїнова паста типу «біологічних рукавичок»; захисна фурацилінова паста, крем плівкотвірний, силіконовий крем для рук (захист рук у разі неможливості, за характером технологічного процесу, використання рукавичок для захисту шкіри рук, а також відкритих ділянок тіла).
- обов'язково необхідно мити руки після роботи;
- змивання смол зі шкіри виконується за допомогою суміші спирту, глицерину й нашатирного спирту; фенол змивати мильною водою, слабким розчином питної соди; рекомендується після змивання смол змашувати шкіру маззю.

В умовах підвищеної запиленості рекомендуємо використовувати: захисні окуляри; респіратори: «Лепесток», «Астра», РІП-67, Ф-62-Ш, АЛІНА-200 АВК; протигази: протигаз марки А чи марки А з фільтром, ЦП-5, ЦП-5М, ЦП-7 з патроном ДПГ-1, протигаз марки СО; спецодяг з паперової тканини; при

контакті з рідкими продуктами використовувати наруківники, фартухи, взуття з поліетилену, рукавиці з хлорсульфонованого поліетилену чи полівінілового спирту.

Потрібно 1 раз на рік робити медичний огляд працівників, проводити їх ретельне динамічне обстеження; детально вивчати санітарно-гігієнічні умови роботи.

Дотримання усіх правил охорони праці та техніки безпеки під час виготовлення виробів з композиційних матеріалів, що наведені у статті, дозволить знизити ризик ураження організму людини, мінімізувати негативний вплив шкідливих речовин, що входять до їх складу на здоров'я робітників.

Висновок. На даний час на промислових підприємствах, які зайняті переробленням композиційних матеріалів на основі епоксидних та фенолформальдегідних смол, небезпечні речовини, які входять до їхнього складу чи виділяються у процесі виготовлення та переробки, не перевищують чи незначно перевищують допустимі величини. Таким чином, випадки професійних захворювань та інтоксикацій зустрічаються досить рідко, тільки у разі порушення технології виробництва й техніки безпеки. Отже, якщо дотримуватись технології виробництва композиційних матеріалів і запропонованих заходів безпеки, негативний вплив шкідливих речовин на працівників і навколишнє середовище, професійні захворювання і ризик ураження організму людини буде мінімізовано.

Список використаної літератури:

1. Фенолоальдегидные смолы. Фенопласты. URL: <https://studopedia.info/6-36646.html>
2. Профессиональные заболевания, вызванные полимерами. URL: https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625a2ad68b5c53a89521306c27_1.html
3. Вредные вещества. URL: <http://ekobalans.ru/harmful-substances/vliyanie-aldegidov-na-cheloveka>
4. Меры безопасности при использовании полимерных материалов. URL: http://ohrana-bgd.narod.ru/proizv_48.html
5. Энциклопедия по безопасности и гигиене труда: пер. с англ.: [в 4 т.] / Международная организация труда, Женева; Гл. ред. А. П. Бирюкова; Редкол.: А. А. Брежнев [и др.]. – 3 изд. – Москва: Профиздат, 1988.
6. Инструкция по охране труда и радиационной безопасности. URL: [web.nioch.nsc.ru > nioch > templates > purity_iii > files > instructions](http://web.nioch.nsc.ru/nioch/templates/purity_iii/files/instructions)
7. Бацукова Н.Л. Гигиена труда на предприятиях по производству и переработке синтетических полимерных материалов. URL: <https://www.bsmu.by/files/02ff52b4a92e09ed97aebe0f39cce06a/>

O. Krukovska, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, **ORCID** 0000-0002-3554-7204

Y. Lytvynova, student, **ORCID** 0000-0002-1915-3459
Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

SAFETY MEASURES IN THE MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON EPOXY AND PHENOL-FORMALDEHYDE RESINS

The article deals with the dangers, which can appear during manufacturing and processing of composite materials. Actuality of the theme is due to the fact, that the modern industry can not be limited by the use of traditional materials, that's why they are replaced by composites which are widely used in almost all branches of industry. For getting better properties of composites to their content are added various additives, to get better exploitation characteristics, but additives, monomers and composites during their processing can have a negative impact on the human body. In particular, during the manufacture of materials can be used or release during the processing of substances which are toxic and may lead to poisoning. Both in the production of composites and in their processing in products, in the air of working room appear various harmful gaseous substances and dust, which can be the cause of the negative changes in the body of workers. In order to avoid professional injuries, adverse health effects and professional disease, it is necessary to follow the technologies of manufacturing of composites and safety measures that are considered in this article.

Keywords: composites, epoxy resins, phenol-formaldehyde resins, dangers, safety measures.

References

1. Fenoloaldegidnyie smoly; Fenoplasty [Online]. Available: <https://studopedia.info/6-36646.html>
2. Professionalnyie zabolevaniya, vyizvannyie polimerami [Online]. Available: https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625a2ad68b5c53a89521306c27_1.html
3. Vrednye veschestva [Online]. Available: <http://ekobalans.ru/harmful-substances/vliyanie-aldegidov-na-cheloveka>

4. Mery bezopasnosti pri ispolzovanii polimernyih materialov [Online]. Avaliable: http://ohrana-bgd.narod.ru/proizv_48.html

5. Encyclopedia of occupational health and safety. Moskva: Profizdat, 1985-1988.

6. Instruktsija po ohrane truda i radiatsionnoj bezopasnosti [Online]. Avaliable: [web.nioch.nsc.ru › nioch › templates › purity_iii › files › instructions](http://web.nioch.nsc.ru/nioch/›templates/›purity_iii/›files/›instructions)

7. Batsukova N.L. Gigiena truda na predpriyatiyah po proizvodstvu i pererabotke sinteticheskikh polimernyih materialov [Online]. Avaliable: <https://www.bsmu.by/files/02ff52b4a92e09ed97aebef39cce06a/>

УДК 614.8

О.Э. Крюковская, канд. техн. наук, доцент, **ORCID** 0000-0002-3554-7204

Е.Э. Литвинова, студент, **ORCID** 0000-0002-1915-3459

Днепровский государственный технический университет, г. Каменское, Украина

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ И ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ

В статье рассмотрены опасности, которые могут возникнуть при изготовлении и переработке в изделия композиционных материалов. Актуальность темы связана с тем, что современная индустрия уже не может ограничиваться использованием традиционных материалов. Им на смену приходят современные материалы - композиты, которые широко применяются почти во всех отраслях промышленности. Для получения улучшенных свойств композитов в их состав добавляются различные добавки. Это позволяет достичь лучших эксплуатационных свойств, но добавки, мономеры и сами композиты при их переработке могут оказывать негативное влияние на организм человека. В частности, при изготовлении материалов возможно применение или выделения в процессе переработки веществ, которые являются токсичными, что приводит к отравлениям. Как при производстве композитов, так и при их переработке в готовые изделия, в воздухе рабочего помещения образуются различные вредные газообразные вещества и пыль, что приводит к развитию негативных изменений в организме работников. Для того, чтобы избежать производственного травматизма, вредного влияния на здоровье и профессиональной заболеваемости необходимо придерживаться технологии производства композитов и мер безопасности, которые рассмотрены в этой статье.

Ключевые слова: композиты, эпоксидные смолы, фенолформальдегидные смолы, опасности, меры безопасности

Надійшла 20.11.2019

Received 20.11.2019

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводиться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом.** Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi.** Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку.** Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправлятись не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки: (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних **літературних джерел подається двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: **+38(044) 204-82-37;**
- сайт: [http://energy.kpi.ua;](http://energy.kpi.ua)
- e-mail: kravkpi@ukr.net